NOTICE SUR LES TITRES

ET

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DU

Dr GEORGES WEISS

PARIS

MASSON ET Cie, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1911







TITRES SCIENTIFIQUES — FONCTIONS DISTINCTIONS HONORIFIQUES

1879. École polytechnique.
1881. Élève ingénieur des Ponts et Chaussées.
1883. Licencié ès sciences physiques.
1884. Ingénieur des Ponts et Chaussées.
1884. Préparateur de Physique à la Faculté de médecine.
1884. Membre de la Société de Physique.
1888. Chef des travaux pratiques de Physique à la Faculté de médecine.
1889. Docteur en médecine.
1889. Lauréat de la Faculté de médecine (Médaille de bronze).
1889. Agrégé de la Faculté de médecine de Paris.
1889-1898. Chargé des conférences de Physique médicale à la Faculté de Médecine.
1896. Membre de la Société de Biologie.
1898. Secrétaire de la Société de Physique.
1898. Membre de la Commission internationale de l'Institut Marey.
1899. Lauréat de l'Institut (Prix Pourat).
1900. Président du Comité d'organisation du Congrès international d'Électricité médicale.
1900. Secrétaire de la Section de Physiologie du Congrès international de Médecine.
1900-1902. Membre du Conseil de la Société de Physique.
1900. Secrétaire de la Section des Mesures électriques et d'Électricité médicale de l'Exposition de 1900.
1902-1907. Chargé des leçons d'Ophtalmométrie du cours de perfectionnement de la Clinique de l'Hôtel-Dieu.
1904. Lauréat de l'Académie de médecine (Prix Buignet).
1904. Sous-directeur de l'Institut Marey.
1907. Membre de l'Académie de médecine.
1908. Président de la Commission interministérielle pour les accidents dus à l'Électricité industrielle.
1909. Vice-président de la Société de Biologie.
1909-1911. Secrétaire annuel de l'Académie de médecine.

1900. Chevalier de la Légion d'honneur.
1905. Officier d'Académie.

PUBLICATIONS

1. Technique d'électro-physiologie. Paris. Masson et Gauthier-Villars.
2. Traité de physique biologique, publié sous la direction de MM. d'Arsonval, Chauveau, Gariel, Marey, secrétaire de la rédaction, G. Weiss. Paris. Masson.
3. Précis de physique biologique. Paris. Masson, 1905.
4. Leçons d'ophtalmométrie. Paris. Masson, 1906.
5. Physiologie générale du Travail musculaire et de la Chaleur animale. Paris. Masson, 1909.
6. Précis de Physique biologique. 2e Édition. Paris. Masson, 1910.
7. Divers articles dans la Revue générale des Sciences pures et appliquées, le Dictionnaire de physiologie de Richet, le Traité de physique biologique, Ergebnisse der physiologie.

TRAVAUX ORIGINAUX

Dans l'exposé qui suit je n'ai pas observé l'ordre chronologique dans lequel mes travaux ont été exécutés, il m'a semblé préférable de les grouper par sujets. Il m'est arrivé plusieurs fois de laisser en suspens une question dans laquelle je me trouvais arrêté, soit par la nécessité de créer un outillage nouveau, soit pour toute autre raison, et de ne la reprendre que quelques années plus tard.

Tous mes travaux portent sur la Physique biologique. Depuis mon entrée à la Faculté de médecine, en effet, je me suis exclusivement consacré aux études de physique appliquée à la Physiologie et à la Médecine. Je m'y suis attaché, aussi bien dans mes recherches de laboratoire que dans mon enseignement, comme agrégé ou comme chef des travaux pratiques de Physique depuis vingt-deux ans.

J'ai toujours saisi avec empressement les occasions qui se sont présentées d'aller faire des leçons dans divers services hospitaliers.

Je ne suis retourné à la Physique pure que lorsqu'il s'agissait de créer des appareils ou des méthodes utiles à la physiologie et à la médecine, quand il était intéressant de reproduire sur la matière non organisée un résultat obtenu chez les êtres vivants, afin de l'isoler et de pouvoir mieux l'étudier.

Mes travaux sont groupés sous dix Titres. Afin de faire mieux ressortir les résultats obtenus, je les ai résumés dans une première partie de lecture rapide, permettant d'en juger l'ensemble, et j'ai réservé pour une seconde partie l'exposé des dispositifs et des méthodes de technique que j'ai imaginées pour mes expériences.

Pendant deux ans, j'ai présidé la Commission interministérielle pour l'étude des accidents dus à l'électricité industrielle. A ce titre, j'ai été intimement associé à l'élaboration et à l'exécution de nombreuses expériences faites au Laboratoire central d'électricité, et destinées à servir de base aux conclusions de la Commission.

Ces travaux sont terminés, mais ne peuvent être livrés à la publicité avant d'avoir reçu l'approbation ministérielle.

TABLE DES MATIÈRES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

PREMIÈRE PARTIE

TITRE I

L'ÉLECTROLYSE

L'électricité est employée en médecine sous diverses modalités. A l'époque où je commençai mes recherches de laboratoire l'attention était surtout attirée par les applications du courant continu fourni par la pile. On l'utilisait en chirurgie, en particulier pour la destruction de tumeurs érectiles ou de lymphangiomes inopérables, en gynécologie et en médecine.

A priori on était porté à croire que les effets d'électrolyse du courant continu restaient localisés aux points d'application sur les tissus des électrodes métalliques reliées à la pile. Les expériences de laboratoire le faisaient supposer; on savait que le courant continu traversant un milieu décomposable ne donnait lieu qu'à un dégagement acide au pôle positif et basique au pôle négatif, sans action apparente dans l'espace interpolaire. Cependant, dans la pratique, certains faits ne s'expliquaient pas en admettant que l'action du courant se limitât à une simple mise en liberté, aux dépens des sels imprégnant l'organisme, d'acides et de bases aux points de contact des électrodes avec les tissus.

Ce problème fut l'objet de mes premières recherches, j'opérai sur le muscle, qui me parut particulièrement favorable à ce genre d'expériences.

Il est en effet possible, à chaque instant, de vérifier si les propriétés

physiologiques du muscle se modifient. Il suffit pour cela de le relier à un myographe et de prendre le tracé d'une secousse provoquée artificiellement. Cette exploration n'altère en rien, par elle-même, l'organe sur lequel on opère, et l'on peut ainsi suivre fidèlement l'action modificatrice de toute cause étrangère que l'on fera agir sur lui.

On savait qu'en provoquant une série de secousses d'un muscle, relié au myographe, par la fermeture d'un courant de pile traversant le muscle toujours dans le même sens, la hauteur de la secousse allait en diminuant, mais on attribuait, en général, cet effet à la fatigue.

Je montrai qu'il n'en était rien et je mis en évidence l'existence d'une altération due à ce que je nommai l'*électrolyse interpolaire*, se produisant sur tout le trajet du courant dans le muscle.

Je mis en effet successivement en évidence les faits suivants :

1. La soi-disant fatigue d'un muscle excité par un courant le traversant *toujours dans le même sens* ne se répare pas.

2. La fatigue que l'on obtient en excitant le muscle par un courant dont *on alterne le sens* se répare plus ou moins rapidement si le muscle conserve sa circulation.

3. Si l'on fait passer dans un muscle un courant continu assez faible pour ne pas provoquer de contraction, sa contractilité baisse peu à peu.

4. On sait que les phénomènes d'électrolyse sont accompagnés de ce qu'on appelle la polarisation. Généralement, cette polarisation n'a lieu qu'aux électrodes. A l'aide d'une méthode spéciale décrite dans la seconde partie de cet exposé, je démontrerai l'existence d'une polarisation dans l'intérieur même du muscle.

5. Si, sur un animal intact, on soumet pendant un certain temps un muscle au passage d'un courant continu, on constate dans les jours qui suivent cette opération une chute graduelle de la contractilité, et, si l'action a été suffisante comme intensité du courant ou comme durée d'application, il en résulte une atrophie progressive du muscle que rien ne semble pouvoir arrêter.

6. Le microscope m'a permis de suivre les altérations d'un caractère

très spécial qui accompagnent la chute de contractilité et l'atrophie des muscles consécutives au passage du courant continu.

7. Aucun de ces phénomènes ne se produit avec le courant alternatif.

8. Un schéma m'a permis de montrer l'électrolyse interpolaire *in vitro*.

En résumé :

Le courant continu agit sur les tissus d'une façon particulièrement intéressante pour le médecin. Cette action se produit sur tout le passage du courant et peut, lorsqu'elle dépasse certaines limites, entraîner des conséquences très graves. C'est ainsi que dans les accidents dus à l'électricité industrielle on observe des différences considérables suivant que l'on a affaire au courant continu ou au courant alternatif.

Dans une thèse sur les brûlures électriques[1], je trouve une observation où le passage du courant à travers les bras a entraîné une atrophie musculaire progressive dont l'auteur ne saisit pas la raison, et due en réalité à ce que le courant était *continu*, comme dans mes propres expériences. Ce phénomène ne se rencontre pas dans des accidents par courant alternatif.

1. *Étude clinique sur les brûlures causées par l'électricité industrielle.* C. Oliveira Néry, 1895.

TITRE II

LA RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DU CORPS HUMAIN

Les variations que peut présenter la résistance électrique du corps humain constituent un autre problème intéressant. Quelques auteurs avaient constaté une chute de cette résistance dans la maladie de Basedow; d'autres trouvaient qu'elle augmentait considérablement au cours de certaines névropathies et vésanies.

La première des choses était de fixer une méthode de mesure pratique, de déterminer les limites dans lesquelles variait la résistance normale, et enfin de rechercher quelles pouvaient être les causes de variations.

Les résultats obtenus jusque-là n'étaient évidemment pas comparables entre eux, d'un auteur à l'autre les écarts étaient énormes. De deux déterminations données comme normales, l'une était vingt ou trente fois plus grande que l'autre. Il était dès lors impossible d'attribuer avec certitude à des causes pathologiques certaines variations de valeur inférieure.

Je me servis d'abord d'une première méthode de mesure due à Kohlrausch et basée sur l'emploi des courants alternatifs, dans le but d'éliminer les phénomènes de polarisation signalés dans le Titre I. Je fis avec elle quelques déterminations. Mais, dans la suite, j'employai un dispositif à courant continu, où, grâce à un artifice, les phénomènes de polarisation se compensaient suffisamment pour ne donner lieu qu'à des erreurs inappréciables. J'exécutai alors un grand nombre de mesures sur des sujets normaux.

Voici les résultats de ces mesures faites généralement d'une main à l'autre, ou d'une main à la nuque pour l'examen comparatif du côté droit et du côté gauche du corps.

1. La résistance électrique est un peu plus grande chez les femmes que chez les hommes.

Hommes.	Femmes.
Moy. de 16 exp.	Moy. de 7 exp.
1515 ohms.	1517 ohms.

2. Sur un sujet la résistance peut varier dans les mêmes limites que d'un sujet à l'autre. Elle dépend de conditions diverses difficiles à préciser; il faut notamment tenir grand compte des occupations auxquelles le sujet vient de se livrer; par exemple, sur les préparateurs de mon laboratoire, faisant un travail assez uniforme, les variations étaient bien moindres que sur les garçons, qui circulaient tantôt au chaud, tantôt au froid, maniaient des corps variés et se livraient parfois à des travaux de force.

Par conséquent, lorsqu'on veut effectuer des déterminations de résistance comparables, il importe de mettre au préalable les sujets, pendant un temps assez prolongé, dans des conditions aussi semblables que possible. Le mieux est de les tenir quelque temps au repos, à la chambre.

3. Au point de vue de la résistance électrique, le corps n'est pas symétrique. En mesurant la résistance de la main à la nuque, on trouve généralement une quarantaine d'ohms de plus à gauche qu'à droite.

4. L'intensité du courant employé à la mesure influe sur la valeur de la résistance, mais on a beaucoup exagéré cette influence. Sur certains sujets, une intensité six à sept fois plus forte fait à peine varier la résistance du dixième de sa valeur; sur d'autres, la variation peut être un peu plus importante.

5. Ce ne sont pas, comme on le croyait, les modifications de l'irrigation sanguine qui font varier la résistance, car l'application de la bande d'Esmarch au bras ne l'augmente que très peu.

6. La température de l'eau, dans laquelle la main est plongée pour la mesure, a une influence notable; en la faisant passer de 30° à 5° on peut augmenter la résistance d'environ 200 ohms.

7. Les différences de résistance que l'on peut observer sur divers sujets ne tiennent donc pas à la circulation, mais à un état particulier de la peau aux points d'application des électrodes.

TITRE III

LA LOI DE L'EXCITATION ÉLECTRIQUE DES NERFS ET DES MUSCLES

Pendant plusieurs années j'ai poursuivi l'étude d'un problème qui sollicitait depuis longtemps les recherches de nombreux physiologistes : la détermination des éléments de la décharge électrique dont dépend l'excitation des nerfs et des muscles.

Voici en quoi consiste exactement ce problème et quel est son intérêt.

Une comparaison empruntée à la chaleur me fera mieux comprendre. Supposons que l'on veuille fondre de la glace ; on aura avant tout à se préoccuper du nombre de calories dont on dispose : avec 100 calories on fondra toujours la même quantité de glace, que ces calories proviennent d'une source à 20°, à 40° ou à toute autre température au-dessus de zéro. Il y a au contraire d'autres cas où la température de la source est la condition essentielle du phénomène à produire. Par exemple, la pression de la vapeur dans une chaudière est directement liée à sa température.

Il en est de même pour les effets du courant électrique. Si l'on veut électrolyser une certaine quantité de sel dissout dans l'eau, c'est la quantité d'électricité débitée qui sera l'unique facteur de cette électrolyse. S'il s'agit d'échauffer un fil métallique, c'est seulement de l'intensité du courant que dépend la chaleur obtenue. En somme, pour chaque phénomène, il y a un certain facteur, ou quelquefois une combinaison de facteurs, qui règle l'effet produit. La simple connaissance des facteurs d'un phénomène permet souvent de le classer dans une catégorie déterminée, ou tout au moins de l'exclure de certaines catégories auxquelles il ne peut appartenir : c'est alors là un premier renseignement important sur la nature de ce phénomène.

L'étude des facteurs de l'excitation électrique des nerfs et des muscles

apparaît donc comme un moyen précieux d'aborder le problème encore si obscur de la nature de l'influx nerveux.

Le problème a été posé nettement depuis plus de cinquante ans, par Du Bois Reymond, qui en a fait l'objet de ses recherches pendant une grande partie de sa carrière. De nombreux physiologistes s'y sont attachés depuis et les solutions les plus diverses ont été proposées.

Moi-même, longtemps lancé sur de fausses pistes, tantôt par les idées de Du Bois Reymond, tantôt par des tentatives destinées à relier l'excitation à l'énergie de la décharge, j'avais fait de multiples expériences sans succès, lorsqu'à la suite de recherches exécutées pendant l'hiver 1900-1901 je pus formuler la règle connue aujourd'hui en France et à l'étranger sous le nom de « Loi de Weiss ». Cette loi a été soumise à diverses vérifications en France et à l'étranger, et elle est admise aujourd'hui par tous les physiologistes. En se basant plus tard sur des considérations complètement différentes de mes expériences, le professeur Nernst (de Göttingen) a été amené à retrouver ma formule.

J'ai mis en évidence un facteur jusque-là négligé et que mes expériences ont montré comme ayant une importance de premier ordre : c'est la durée de la décharge employée à produire l'excitation.

J'ai dû pour faire mes recherches construire un appareil permettant de mesurer la durée de passage des décharges électriques dont je faisais usage. Quoique l'unité de temps que j'adoptais fût inférieure au cent millième de seconde, j'ai pu obtenir un fonctionnement régulier et précis de mon instrument et il en a été de même des divers expérimentateurs qui ont repris, continué ou développé mes recherches.

Mes résultats ont été synthétisés finalement dans une formule : $Q = a + bt$. Elle signifie que pour amener un nerf ou un muscle au seuil de l'excitation, il faut que la décharge électrique utilisée mette en jeu une quantité constante d'électricité a, plus une quantité bt, variable et proportionnelle à la durée t du passage de la décharge. L'excitation électrique d'un nerf ou d'un muscle peut être considérée comme un phénomène obtenu par le passage à travers l'organe à exciter d'une quantité déterminée d'électricité a. Mais comme il faut un certain temps pour ce

passage et que l'effet tend sans cesse à se détruire, il est nécessaire de combattre ce retour en arrière par une quantité d'électricité supplémentaire et proportionnelle à la durée de la décharge.

J'ai montré en outre par mes expériences que les autres formules proposées devaient être rejetées.

Toutes les théories émises sur la nature de l'influx nerveux devront tenir compte de cette loi. Elle permet de faire une élimination et de restreindre le champ des hypothèses.

TITRE IV

RECHERCHES DIVERSES SUR LA PHYSIOLOGIE DU NERF ET DU MUSCLE

La physiologie du nerf et du muscle a été pendant plusieurs années l'objet de prédilection de mes recherches. J'ai publié sur ce sujet nombre de notes ou de mémoires, soit à la Société de Biologie, soit à l'Académie des Sciences, soit enfin dans les journaux de Physiologie. Le détail de ces publications, dont quelques-unes ont été faites en collaboration avec Carvallo, se trouve dans la seconde partie de mon exposé; j'en indique ici les résultats principaux.

Après que Marey eut montré l'influence remarquable de la température sur la contraction musculaire, Gad et Heymans, ayant repris cette étude, formulèrent à ce sujet une loi devenue classique. Ces auteurs avaient conclu de leurs expériences que lorsqu'on provoque la secousse du gastrocnémien de la grenouille, cette secousse a un premier maximum d'amplitude à la température de 0° ; puis à mesure que la température s'élève, jusque vers 18°, cette amplitude va en diminuant; enfin de 18° à 35° environ elle augmente et atteint à cette dernière température un second maximum.

Nous avons montré avec Carvallo que cette règle est loin d'être générale. On peut, en faisant varier les conditions de l'expérience, en particulier le poids tenseur et la grandeur d'excitation, obtenir des relations tout autres entre la température et l'amplitude de la secousse.

Nous avons ensuite mis en évidence un fait très intéressant.

Si prenant un tracé à la température du laboratoire sur un muscle conservant sa circulation, on provoque des secousses à intervalles éloignés, toutes les 6-8 secondes par exemple, ces secousses ont, après l'escalier

du début, une amplitude constante pendant un temps fort long, trois, quatre, cinq heures et même davantage, il n'y a pour ainsi dire pas de fatigue quand l'animal est en bon état.

Si au contraire l'on opère à 0°, on voit les secousses diminuer de hauteur assez rapidement et, au bout de quinze à vingt minutes, le muscle paraît complètement épuisé, et ne répond plus à aucune excitation. Si l'on vient, à ce moment de complet épuisement, à supprimer la glace qui entoure le muscle en la chassant, par exemple, avec un courant d'eau à la température du laboratoire, on voit instantanément la secousse reprendre une forte amplitude. On peut répéter un grand nombre de fois sur le même muscle cette même expérience.

On obtient des résultats analogues en opérant sur le muscle séparé du corps et privé de circulation, sauf que la fatigue survient plus rapidement à chaque nouvelle expérience et que le muscle finit par s'épuiser définitivement.

Ces résultats expérimentaux autorisent à penser que la contraction musculaire se produit aux dépens d'une substance indéterminée dont les éléments existent sur place dans le muscle même, mais dont la formation ne se fait pas à 0°.

J'ai étudié l'influence des variations de température sur la propagation de l'influx nerveux et j'ai mis en évidence un fait important au point de vue des théories sur la nature de ce phénomène.

Helmholtz avait cru voir qu'en refroidissant le nerf moteur d'un muscle, la secousse provoquée par excitation de ce nerf s'allongeait considérablement, quoique la température du muscle lui-même ne variât point. On devait conclure, de ce fait, que tout le phénomène de la contraction ne tirait pas son origine du muscle même ; que l'action du nerf ne se réduisait pas simplement à amorcer cette contraction, mais que le système nerveux avait dans le phénomène une part supérieure à celle qui lui était généralement attribuée. J'ai repris l'expérience de Helmholtz et j'ai constaté, au contraire, qu'en préservant soigneusement le muscle contre toute variation de température, on pouvait faire passer le nerf de 20° à 0° sans observer le moindre

changement dans le tracé de la secousse. L'erreur d'Helmholtz tenait certainement à ce qu'il refroidissait plus ou moins le muscle en même temps que le nerf. J'instituai alors toute une série d'expériences pour étudier les effets de la température sur la propagation de l'influx nerveux, sur le réflexe médullaire et sur la secousse musculaire.

J'ai constaté que lorsqu'on refroidit un muscle, sa période latente augmente instantanément; elle peut quadrupler, quintupler même en passant de la température du laboratoire à 0°. Il en est de même pour le réflexe de la moelle; aussitôt que l'on pose un petit morceau de glace sur le dos de la grenouille sur laquelle on opère, on voit augmenter la période latente réflexe. L'influence du refroidissement médullaire est immédiate.

Mais il n'en est pas du tout de même pour la vitesse de propagation de l'influx nerveux. On peut refroidir un nerf sans que cette vitesse change, il peut s'écouler jusqu'à cinq minutes et même davantage sans que l'on observe aucune variation. La propagation de l'influx nerveux paraît donc être un phénomène de nature toute spéciale, puisque, contrairement à ce qui se passe pour tous les organes en général, il ne dépend pas de la température.

J'ai montré que, à l'inverse de ce qui a lieu pour le muscle, l'excitabilité du nerf baisse lorsqu'on exerce sur lui une très légère traction, et reprend sa valeur primitive aussitôt que cesse cette traction.

Le professeur L. Hermann a fait remarquer que je me trouvais sur ce point en contradiction avec tous les auteurs qui ont étudié cette question. Mais mes expériences ont été contrôlées en Allemagne par R. Du Bois Reymond, en prenant toutes les précautions que j'ai indiquées, et ont été pleinement confirmées.

Un problème important de la physiologie du nerf est de savoir si deux excitations peuvent interférer, c'est-à-dire se détruire l'une l'autre quand elles sont portées sur le nerf à des distances différentes du muscle.

J'ai montré, contrairement à d'autres auteurs, qu'il n'en était rien;

jamais on n'observe d'interférences nerveuses. Celles que l'on a cru voir proviennent d'erreurs de technique qu'il est aisé de mettre en évidence.

Personne jusqu'ici n'avait essayé de résoudre expérimentalement cette question si embarrassante : savoir si les diverses terminaisons nerveuses dans le muscle sont isolées ou en connexion les unes avec les autres. L'accord est loin d'être établi sur ce point entre les histologistes; les uns comme Ramon y Cajal soutiennent la non-connexion, dans la théorie dite du neurone, tandis que les autres, comme Apathy, soutiennent l'existence d'un réseau nerveux intra-musculaire analogue au réseau sanguin. La discussion se base sur les résultats de procédés de coloration; mais même dans le cas où l'histologie révèle des connexions évidentes il reste à être fixé sur leur valeur fonctionnelle.

Après des essais variés, j'ai trouvé un procédé me permettant d'aborder le problème par l'expérience. Je le décris dans la seconde partie de mon exposé. Le résultat général auquel il m'a conduit est que, s'il existe des connexions entre les plaques terminales motrices, elles sont fonctionnellement très restreintes.

Dans un travail en collaboration avec Dutil, j'ai démontré que les organes terminaux inclus dans le muscle, dits fuseaux neuro-musculaires, auxquels on attribuait jusque-là divers rôles, les uns les prenant pour des productions pathologiques, les autres pour des fibres ou des plaques en voie de développement, étaient en réalité des terminaisons sensitives de la même nature que les terminaisons tendineuses, et probablement en rapport avec le sens musculaire.

Nous avons montré en outre, Dutil et moi, que dans la dégénération après section expérimentale du nerf, c'est au moment où la plaque motrice se sépare du nerf que celui-ci cesse de transmettre son excitation au muscle. La dégénération commence donc à la périphérie.

C'est à propos de mes recherches sur les relations qui existent entre la dégénération ou régénération du nerf et les propriétés fonctionnelles du

muscle que j'ai le premier décrit la disposition réticulée des fibrilles du cylindre-axe.

Quelques recherches relatives à l'influence de l'acide carbonique sur la conductibilité et l'excitabilité du nerf m'ont amené à observer un phénomène paradoxal dont l'explication m'échappe encore. Étant donné un muscle avec son nerf moteur isolé sur une grande longueur, si, par un dispositif spécial, on fait baigner tout ou partie de ce nerf dans l'acide carbonique, on constate que l'excitabilité baisse moins lorsque le nerf est tout entier plongé dans le gaz que lorsqu'il n'y est plongé que sur un point de son trajet, l'excitation se faisant au niveau du bout placé dans l'air.

On sait que M. Ranvier a mis en évidence les propriétés physiologiques différentes de la fibre musculaire blanche et de la fibre musculaire rouge. Ces deux espèces de fibres sont particulièrement bien séparées chez le lapin où elles forment des muscles entièrement blancs et rapides, d'autres entièrement rouges et lents.

C'est au mélange en proportion variable de deux espèces de fibres analogues que l'on attribue les différentes formes de courbes myographiques des divers muscles des animaux.

Certains auteurs ont pensé que c'est à la dissociation des secousses de ces deux fibres que l'on doit attribuer la forme si particulière que l'on rencontre chez les animaux empoisonnés par la vératrine, la secousse de l'une des fibres ne se produisant alors que lorsque l'autre est déjà presque terminée.

Pour trancher la question il fallait faire des enregistrements sur le lapin, où l'on peut prendre des tracés de muscles blancs purs ou rouges purs. En admettant la théorie de la dissociation de la secousse, la courbe de la vératrine ne peut apparaître sur les muscles d'une seule couleur du lapin.

Ces expériences sont délicates, il faut bien isoler le muscle sur lequel on opère pour ne pas avoir d'erreur provenant de connexions avec les muscles voisins, et malgré cette séparation le muscle doit conserver sa circulation intacte pour ne pas s'altérer. Enfin le lapin supporte mal la vératrine, une

dose un peu trop faible ne produit aucune action sur le muscle, une dose un peu trop forte tue l'animal.

Nous avons cependant pu obtenir un certain nombre de tracés très beaux, sur lesquels on voit la courbe caractéristique de la vératrine, soit sur un muscle complètement blanc, soit sur un muscle complètement rouge.

L'altération de la secousse du muscle par la vératrine ne peut donc tenir qu'à une modification de l'excitabilité de la fibre musculaire, qu'elle soit blanche ou rouge, et ne résulte pas de la dissociation des secousses de ces deux espèces de fibres.

De nombreuses expériences ont été faites sur la résistance du muscle à l'allongement, tant à l'état de repos que pendant sa contraction.

Au cours de recherches sur cette question, nous avons, M. Carvallo et moi, mis en évidence le fait suivant, extrêmement intéressant.

Quand on pratique l'allongement du muscle par traction, la résistance à la rupture est plus grande pendant la contraction que pendant le repos. De plus, l'excès de résistance pendant la contraction est précisément égale à la force de traction que le muscle est capable d'exercer.

Par exemple, prenons un gastrocnémien de grenouille dont la rupture au repos se fera sous une charge de 1 kilogramme. Mesurons sa force de traction au moment de sa tétanisation, elle sera de 600 grammes. La résistance à la rupture du muscle tétanisé sera de $1^{k},600$.

C'est-à-dire que la force développée par la contraction est un phénomène qui s'additionne à la résistance du muscle. Cette force n'est pas due à une modification du muscle, c'est une propriété nouvelle qui se surajoute à ce qui existait déjà. De même l'attraction qui se produit entre les diverses spires d'un solénoïde parcouru par un courant n'a aucune relation avec les propriétés élastiques du solénoïde lui-même, elle ne dépend que du courant, c'est-à-dire d'un phénomène indépendant du solénoïde.

J'ai cherché à éclaircir le problème du mécanisme de la contraction

musculaire par tous les côtés abordables. Un de ceux qui s'imposaient était de suivre le développement de la contractilité chez l'embryon.

Mes recherches ont porté sur la grenouille, l'axolotl, le poulet. En faisant comparativement des examens histologiques et des expériences sur l'excitabilité du muscle; j'ai cherché à voir comment se développait chez l'embryon la contractilité de cet organe.

Au début, quand il n'y a pas encore de fibrilles, c'est au protoplasma seul qu'il faut attribuer les mouvements, ils sont lents, automatiques. Chaque excitation produit le même mouvement, qui n'a aucune relation ni avec la grandeur de l'excitation, ni avec l'endroit où elle a été produite ; on n'a fait que déclancher le mouvement, pour ainsi dire.

Une fois que les fibrilles se sont complètement développées, le muscle est excitable localement et répond par une petite secousse brève à chaque excitation, l'amplitude de la secousse croît alors avec la grandeur de l'excitation.

Quand on prend le muscle à un état intermédiaire aux précédents, on voit se produire une superposition des deux effets, le muscle donnant une série de petites secousses en escalier.

J'ai continué l'étude de cette question avec M. Carvallo. Nous avons étudié par la méthode graphique plus de soixante-dix embryons de cobayes aux divers âges, en faisant varier la température. Ces expériences ont été très laborieuses, car il fallait opérer sous l'eau salée tiède en laissant le fœtus en communication avec la mère. Nos tracés ont été joints à un mémoire déposé à l'Institut et auquel a été décerné le prix Pourat. Malheureusement, je n'ai pu rentrer en possession de ce travail pour le publier, par suite de la maladie de M. Marey.

J'ai tenté, à l'aide de la chromophotographie microscopique, de surprendre l'onde de contraction, qui, suivant certains auteurs, accompagne la secousse de la fibre musculaire.

Cette question présentait de nombreuses difficultés. Il fallait faire usage d'un appareil très rapide, l'onde se propageant avec une assez grande vitesse. Par suite même de cette rapidité et du grossissement du micro-

scope une très grande intensité lumineuse était nécessaire, enfin d'excellentes préparations bien vivantes et transparentes étaient indispensables.

Après divers essais, j'opérai sur l'hypoglosse de la grenouille et j'obtins quelques très bonnes épreuves en série. Sur ces épreuves, jamais on ne vit se propager d'ondes. Ce résultat concorde avec l'observation des auteurs, comme Laulanié, qui concluent de leurs expériences que les ondes sont des phénomènes ne se rencontrant que sur le muscle en voie de dépérissement.

TITRE V

RELATION ENTRE LA FONCTION D'UN ORGANE ET SA FORME

On connaît les travaux de Borelli, Marey, W. Roux, etc., sur les relations qui existent entre la longueur des fibres des divers muscles et leur fonction. En général, un muscle est d'autant plus long qu'il doit produire un déplacement plus grand de son insertion mobile. Cependant on ne pouvait conclure des observations faites, que tout muscle avait une longueur proportionnelle au déplacement qu'il devait produire, et qu'il était, par suite, bien adapté à sa fonction, puisque, les divers muscles n'ayant pas le même coefficient de raccourcissement, on ne pouvait les comparer les uns aux autres.

Mais on peut admettre que dans un même muscle le coefficient de raccourcissement est le même pour toutes les fibres qui le composent. Dès lors, en prenant des muscles à fibres non parallèles entre elles, j'ai pu montrer que la longueur de chacune d'elles est réglée de façon à ce qu'en se raccourcissant au moment de la contraction, elles prennent toutes la même par dans l'effort total déployé.

Naturellement l'effet de chaque fibre sera plus ou moins efficace suivant son inclinaison sur la direction du mouvement résultant, mais elle fait de son mieux, son adaptation est parfaite.

Pour faire mes vérifications j'ai déterminé au compas les longueurs des fibres des divers muscles.

Je n'ai pu opérer sur l'homme, n'ayant pas à ma disposition des pièces assez fraîches, mais j'ai exécuté mes mesures sur le chien et sur le singe.

En général mes déterminations ont vérifié les prévisions de ma théorie; cependant, au début, j'ai trouvé quelques anomalies que j'ai signalées.

Dans la suite j'ai reconnu la cause de ces anomalies, et je les ai expliquées. Certains muscles ne sont penniformes qu'en apparence, la

traction de leurs fibres ne se fait pas obliquement au grand axe du muscle, c'est pour cela que je les ai appelés pseudo-penniformes. Non seulement ils ne font pas exception à la règle que j'avais formulée, mais ils viennent la confirmer.

Contrairement à l'opinion de Haughton les muscles sont construits rationnellement, chacun d'eux donne le maximum de ce qu'il peut rendre, il n'y a pas de perte par suite de fausse direction ou longueur défectueuse des fibres.

Marey, W. Roux, Joachimstahl ont montré qu'en modifiant les fonctions du muscle on fait varier la longueur des fibres qui le composent, il y a lieu de multiplier ce genre d'expériences en les étendant à divers organes. J'ai montré qu'en nourrissant de façon différente une même espèce animale, on obtenait des changements dans son tube digestif, dans son squelette et son aspect général. Ces expériences ont été faites sur des canards alimentés exclusivement à la viande, les autres au maïs et au blé.

TITRE VI

LE TRAVAIL MUSCULAIRE

Pendant longtemps, malgré de nombreux travaux exécutés surtout en Allemagne, tous les efforts tentés pour relier le travail produit par les animaux à la dépense d'énergie restèrent infructueux. On n'arrivait pas à se rendre compte des divers facteurs de cette dépense. Ce fut l'œuvre de M. Chauveau de les dissocier, et de montrer l'influence de chacun d'entre eux.

Mais les recherches de M. Chauveau sur le travail musculaire furent publiées par lui sous une forme qui en rendait la lecture extrêmement ardue. D'ailleurs le problème était d'une difficulté extrême et ne fut résolu par lui qu'au bout d'un grand nombre d'années pendant lesquelles il varia et multiplia ses expériences. Les résultats en paraissaient parfois, au premier abord, inconciliables avec des faits classiques ou même les lois fondamentales de la mécanique.

J'ai montré en 1903 comment les expériences de M. Chauveau devaient être interprétées, et sous quelles réserves on pouvait adopter la loi fondamentale formulée par lui pour la dépense d'énergie accompagnant la production du travail musculaire.

M. Chauveau a appliqué aussi sa loi à l'évaluation de la dépense d'un moteur électrique produisant du travail. J'ai fait voir dans quelles conditions on pouvait la généraliser et l'étendre à tous les moteurs. Afin de l'étudier de plus près j'en ai fait l'application à un moteur à eau, dont je pouvais à volonté faire varier le rendement et les conditions de travail.

La formule adoptée par M. Chauveau cesse d'être utilisable quand on dépasse, pendant la production du travail, une certaine vitesse ou une certaine force développée, ces limites variant avec le moteur.

Actuellement, je continue l'étude du travail musculaire avec une méthode de technique nouvelle, dont l'installation m'a coûté beaucoup de temps et de peine, qui fonctionne bien maintenant, mais qui exige une grande patience et dont je ne puis encore publier les quelques résultats obtenus.

TITRE VII

OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE

Il y a environ quinze à vingt ans que la skiascopie ou méthode de Cuignet s'est introduite dans la pratique de l'ophtalmologie, pour déterminer à l'aide de l'ophtalmoscope l'état de réfraction d'un œil. On ne se rendit pas compte immédiatement de la nature de ce phénomène et il donna lieu à des explications variées.

J'en ai donné la première démonstration claire, en appuyant ma théorie sur des preuves expérimentales et reproduisant le phénomène sur un schéma, lequel me permit de montrer la skiascopie en projection sur un écran, à tout un auditoire, comme je l'ai fait devant la Société de Physique.

Les lentilles employées en oculistique sont actuellement numérotées d'après un principe signalé pour la première fois par Giraud-Teulon, à l'aide d'une unité proposée par Javal et nommée *dioptrie* par Monnoyer.

Ce procédé a divers avantages dont le principal est de simplifier beaucoup les calculs dans les cas où l'on superpose deux ou plusieurs lentilles, comme cela est fréquent dans la pratique d'oculistique.

Mais la définition de Giraud-Teulon perdait tout intérêt, quand, au lieu d'évaluer la valeur réfringente de lentilles minces, on s'adressait à des systèmes optiques épais, ou à des systèmes comme l'œil, où le premier milieu traversé par la lumière, c'est-à-dire dans ce cas particulier l'air, n'était pas identique au dernier milieu, le corps vitré. J'ai alors proposé une nouvelle définition de la puissance des systèmes optiques, et montré que cette nouvelle définition remédiait à tous les inconvénients de l'ancienne. Il n'y a rien à changer au numérotage actuel en dioptries des boîtes d'optique, l'ancienne définition étant un cas particulier de celle que je propose et conservant toute sa valeur pour les lentilles minces.

Diverses méthodes ont été employées pour mesurer la valeur des amé-

tropies de l'œil et l'amplitude de l'accommodation. Celle qui résulte de ma définition de la puissance est seule rationnelle.

Elle seule donne, pour la puissance du verre correcteur, précisément le nombre de dioptries en excès ou en défaut dans l'œil à corriger. Ainsi avec ma définition le verre correcteur + 3 indique qu'il manquait 3 dioptries à l'œil que l'on désire ramener à l'emmétropie ; avec les autres définitions cette relation simple n'existe pas.

Continuant mes études sur la puissance des systèmes optiques, j'ai imaginé un appareil permettant de la mesurer, par une seule lecture, quel que soit le système optique. J'ai en particulier donné à un des modèles de mon appareil des dimensions assez réduites pour pouvoir être mis en place d'un oculaire de microscope. On peut alors, avec une grande rapidité et une grande précision, mesurer la puissance d'un objectif quelconque, à sec ou à immersion.

M. Malassez s'est servi de cet instrument pour ses études sur les objectifs microscopiques.

Ce même appareil, à l'aide d'une légère addition que j'y ai apportée, peut servir à la mesure des indices de réfraction des liquides dont on ne possède qu'une petite quantité.

Une goutte suffit. Cette méthode est donc immédiatement applicable à des déterminations sur les liquides de l'œil.

Les effets de l'astigmatisme se font sentir de deux façons :

1. Déformation des images des objets ;

2. Manque de netteté des images.

Si, par exemple, un sujet non astigmate regarde un objet par réflexion sur la cornée d'un astigmate, il voit l'image de cet objet plus ou moins considérablement déformée, mais elle paraît nette.

Si, au contraire, un astigmate regarde directement un objet, il n'est pas frappé par sa déformation, mais par le manque de netteté.

Théoriquement et expérimentalement, j'ai expliqué ces phénomènes

d'une façon simple. J'ai montré dans quelles conditions il fallait se placer pour obtenir l'un ou l'autre à volonté. J'ai démontré qu'avec un appareil photographique et un système astigmate, on peut avoir à volonté un cliché présentant une image nette mais déformée, ou une image non déformée mais sans netteté. Diverses photographies ainsi obtenues sont jointes à mon mémoire.

En regardant le ciel à travers un trou d'épingle percé dans une carte, mon attention a été attirée par un phénomène qui m'avait échappé jusque-là et que je n'ai vu signalé dans aucun auteur. Au lieu de voir, comme je m'y attendais, un rond blanc uniforme, j'aperçus un rond clair avec un cercle plus gris au centre.

La dimension du cercle gris varie avec la grandeur du trou.

J'ai fait voir que ce phénomène peut être expliqué par l'aberration de sphéricité de l'œil.

TITRE VIII

APPAREILS

Au cours de mes recherches de laboratoire, j'ai construit un grand nombre d'appareils ou imaginé diverses méthodes. Je les ai décrits généralement au cours des travaux entrepris avec ces appareils et n'en ai fait que rarement l'objet de publications spéciales.

Je ne citerai à part qu'un dispositif pouvant s'adapter à une balance quelconque pour la rendre enregistrante. On peut, en particulier, avec mon dispositif enregistrer d'une façon continue l'acide carbonique ou la vapeur d'eau éliminés par un animal.

Au moment où les Rayons N semblaient appelés à jouer en Physiologie un rôle considérable, un double micromètre à étincelles me permit de montrer que les expériences photographiques sur lesquelles on s'appuyait pour établir l'existence de ces Rayons ne résistaient pas à une vérification sérieuse.

J'ai aussi été amené à faire des études d'appareils déjà construits. C'est ainsi que j'ai fait une comparaison expérimentale entre les divers modèles de sphygmographes que l'on trouve dans le commerce. J'ai montré que le meilleur est celui de Marey et que c'est le type Dudgeon qui déforme le plus les tracés. Si l'on veut employer ce genre d'instruments à des observations cliniques, on ne peut guère se fier qu'au Marey, et encore faut-il en vérifier la bonne construction et la fidélité.

A l'aide d'un oscillographe de Blondel, j'ai examiné un certain nombre d'appareils d'induction livrés par le commerce. J'ai mis en évidence les diverses défectuosités présentées par la plupart d'entre eux, soit comme graduation, soit comme marche régulière des interrupteurs. J'ai enfin fait une comparaison entre les bobines à fil fin et les bobines à fil gros dont sont munis la plupart des appareils à chariot utilisés par les médecins, afin de rechercher à quoi tiennent les différences d'effets obtenus.

TITRE IX

CHALEUR ANIMALE ET ÉCHANGES GAZEUX

Dans un travail communiqué à l'Académie de Médecine, j'ai fait voir que les enfants nouveau-nés avaient des besoins d'oxygène différents suivant leur état plus ou moins florissant; qu'en particulier les enfants élevés à la couveuse et les débiles absorbaient beaucoup moins d'oxygène que les enfants bien portants, toutes choses égales d'ailleurs.

J'ai montré dans une autre communication que l'antagonisme établi entre la théorie isodynamique des combustions alimentaires, due à Rubner, et la théorie isoglycosique de Chauveau n'existe pas. De plus, on a tiré des expériences d'Atwater sur l'alcool des conclusions que ces expériences ne comportent pas nécessairement.

Pendant plusieurs années, j'ai étudié la respiration des hétérothermes soit dans l'air, soit dans les gaz inertes. J'ai obtenu ainsi divers résultats, dont le plus important a été de montrer que l'organisme ne fait pas de réserves d'oxygène aux dépens de l'atmosphère et que les aliments albuminoïdes nécessitent, avant leur utilisation pour la production de l'énergie, une élaboration donnant lieu à un déchet d'énergie qu'on ne retrouve pas pour le glucose.

TITRE X

ÉLECTROCARDIOGRAPHIE

Installation d'un Électrocardiographe à corde d'Einthoven

Grâce à un artifice, on peut enregistrer sur la même bande un électrocardiogramme et un tracé des bruits du cœur, ce qui permet des comparaisons très précises entre les mouvements du muscle cardiaque et les bruits.

Un appareil simple permet, après avoir pris le tracé des bruits d'un cœur, de reconstituer ce bruit.

DEUXIÈME PARTIE

TITRE I

L'ÉLECTROLYSE

Les recherches que j'ai faites sur l'électrolyse ont été publiées dans :

Contribution à l'étude de l'Électrophysiologie.
Thèse de doctorat en médecine, 1889.

Électrolyse des muscles. — *Société de Biol.*, 28 mars 1896.

Polarisation et Entraînement.
Soc. de Biol., 20 juin 1896 et *Société de Physique*, 3 juillet 1896.

Électrolyse des tissus vivants. — *Arch. d'Électricité médicale*, 1897.

La diminution rapide de la hauteur des secousses d'un muscle, quand ces secousses sont provoquées par la fermeture d'un courant continu les traversant, fut le point de départ de mes recherches sur l'électrolyse interpolaire. Au premier abord, il semblait simplement que le muscle se fatiguait. Mais cette fatigue était d'une nature très particulière. En effet, quand un muscle est relié à un myographe, que l'on pratique l'excitation comme il vient d'être dit, et que la hauteur de la secousse a notablement baissé, si l'on inverse le sens du courant excitateur, on voit la hauteur de la secousse remonter à sa valeur primitive, si toutefois l'action première n'a pas été trop prolongée.

Ce phénomène est connu sous le nom d'alternatives voltianes, mais les auteurs qui le citaient ne savaient à quoi l'attribuer, et le considéraient comme un exemple remarquable de variations de l'excitabilité.

Je multipliai mes expériences sur ces prétendues variations de l'excita-

bilité et sur la fatigue apparente du muscle, et bientôt j'établis deux faits fondamentaux.

1. Si la hauteur de la secousse est tombée à la suite d'excitations électriques produites par la fermeture d'un courant continu traversant toujours le muscle dans le même sens, on peut attendre plusieurs heures sans voir cette fatigue apparente se réparer. Il n'en est pas de même si le muscle a été épuisé à la suite de secousses provoquées par des excitations alternées.

2. Si l'on fait passer dans le muscle un courant assez faible pour ne pas provoquer de secousse, et qu'on l'explore de temps en temps, la hauteur de la secousse que ce muscle est capable de donner diminue peu à peu. En opérant sur un animal vivant, après un ou deux jours de repos, le muscle ne s'est pas réparé.

Si au lieu d'attendre un ou deux jours, on laisse vivre l'animal sur lequel on a expérimenté, non seulement le muscle ne recouvre pas ses propriétés premières, mais il s'atrophie de plus en plus.

Dans le mémoire que j'ai publié en 1897 dans les *Archives d'électricité médicale*, je donne un dessin à la chambre claire de la coupe en travers du gastrocnémien normal d'une grenouille rousse, et comparativement la coupe du même muscle du côté opposé du corps, lequel avait été soumis quatre-vingts jours auparavant pendant quatre minutes à un courant de quatre milliampères. On voit sur ces coupes que la section du muscle électrolysé s'est réduite au moins de moitié, cette atrophie me donna l'idée de suivre au microscope les modifications du muscle accompagnant l'action du courant continu.

Si, quelques jours après une électrolyse analogue à celle que je viens de citer, on fixe le muscle par du bichromate de potasse par exemple, et que l'on fasse des préparations histologiques, on constate que le tissu conjonctif est gonflé, contenant beaucoup de noyaux ; au milieu de fibres d'apparence normale d'autres ont perdu leur situation. Dans la suite, on voit ces mêmes fibres présenter un aspect d'abord finement granuleux, puis se fragmenter et disparaître peu à peu. Bref le muscle s'altère sur tout le trajet du passage du courant. Sur un cobaye l'action fut tellement intense, après

qu'une patte postérieure eut été soumise pendant cinq minutes à un courant variant de 45 à 65 milliampères, qu'au bout de trois semaines, tous les tissus avaient disparu et qu'il ne restait que quelques fragments du squelette de cette patte.

Pour mettre en évidence, d'une façon indiscutable, cette action particulière du courant continu et la différence qui le sépare du courant alternatif, je fis deux genres d'expériences.

Dans la première, je me servis d'un inverseur de courant spécialement construit dans ce but. Un courant de pile traversait l'inverseur qui le transformait en courant alternatif, mais la même quantité d'électricité passait dans la partie du circuit qui précédait l'inverseur et dans celle qui le suivait. Je choisis alors deux grenouilles aussi semblables que possible et j'intercalai leur patte gauche dans le trajet de mon appareil, la patte droite servant de témoin. Une des grenouilles était traversée par le courant continu, l'autre par le courant inversé, tous deux, comme je l'ai dit, débitant la même quantité d'électricité, puisque le courant ne pouvait traverser l'une des grenouilles sans passer par l'autre.

Quelque temps après leur avoir fait subir ce traitement, le lendemain ou le surlendemain, je prenais sur les grenouilles des tracés myographiques comparativement sur la patte soumise au courant et sur la patte saine. Le courant continu produisait toujours une chute de la hauteur de secousse, alors que le courant alternatif restait sans action. Si la durée et l'intensité du courant étaient suffisantes, en laissant vivre les grenouilles, celle qui avait subi l'action du courant continu présentait seule l'atrophie progressive des muscles de la patte.

A l'aide d'un second dispositif, je pus comparer les effets du courant continu et du courant alterné sur une même grenouille. La figure 1 représente mon installation. AB est un levier oscillant autour du point O par le fonctionnement d'un électro-aimant, qui n'est pas représenté, et dont le détail n'offre aucun intérêt. Alternativement, le contact se fait dans deux petits godets *aa*, établissant une communication entre eux, ou en *bb*. Dans le premier cas, la pile P charge le condensateur M, le courant descendant par la patte gauche de la grenouille. Au moment où le contact cesse en *aa*

et se fait en *bb*, le condensateur se décharge, le courant remontant par la patte gauche de la grenouille et ne pouvant aller à terre que par la patte droite. Il en résulte que la patte droite est soumise à une série de décharges la traversant toujours dans le même sens, et la patte gauche à des décharges alternantes. Remarquons que le nombre de décharges passant par la patte gauche est double de celui qui passe par la patte droite, il devrait en résulter une plus grande fatigue pour la patte gauche, et cependant l'expérience montre que la patte droite seule présente les altérations déjà décrites : chute de la hauteur de secousse et atrophie musculaire consécutive. Aucune expérience ne me semble plus probante pour mettre en évidence ces effets du courant dirigé toujours dans le même sens.

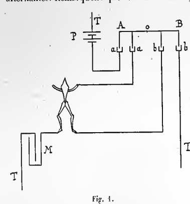


Fig. 1.

Généralement, lors des phénomènes d'électrolyse avec mise en liberté des produits de décomposition aux électrodes métalliques plongées dans une solution, la grandeur de l'action, c'est-à-dire la quantité de produits décomposés, ne dépend que de la quantité d'électricité qui a passé. Ainsi, on obtient le même effet avec 100 milliampères agissant pendant une minute qu'avec 50 milliampères agissant pendant deux minutes ou 25 milliampères pendant quatre minutes.

L'expérience m'a montré que cette loi se confirmait sur les tissus vivants en ce qui concerne les actions localisées aux électrodes.

En piquant une aiguille de platine dans un muscle, à travers la peau, faisant passer un courant continu, et examinant quelques jours plus tard,

sur des coupes convenablement faites, l'étendue de la région altérée au voisinage de l'aiguille, on constate que le résultat est très sensiblement le même pour une même quantité d'électricité débitée, quelle que soit l'intensité du courant et la durée de l'action.

Mais il n'en est plus ainsi pour l'électrolyse interpolaire. Ici les effets croissent très rapidement avec l'intensité du courant. Un courant très faible peut être appliqué impunément pendant un temps fort long sans donner lieu à des altérations graves dans le trajet interpolaire; mais à mesure que l'intensité s'élève, on a beau réduire le temps de façon à faire agir la même quantité d'électricité, la gravité des lésions va en croissant. Cela explique pourquoi, avec des courants très intenses comme ceux que l'on rencontre dans l'industrie, il suffit d'un contact très court, ne donnant lieu qu'au passage d'une quantité d'électricité en apparence tolérable, pour produire des accidents redoutables, comme ceux que nous trouvons dans la thèse de M. de Oliveira Néry.

Cette électrolyse en dehors des points d'application des électrodes peut s'expliquer par le fait que le muscle n'est pas un conducteur homogène, et l'on peut montrer sur un schéma que, dans ce cas, le courant donne lieu à des modifications au point de contact de deux liquides ou masses gélatineuses n'ayant pas la même constitution chimique.

Prenons un tube en U, au fond duquel nous versons de la gélatine fondue dans de l'eau et colorée par du tournesol. Quand la prise est faite, versons encore dans chaque branche la même solution à laquelle nous aurons ajouté un peu de chlorure de sodium. Puis faisons passer un courant, une électrode en platine se trouvant dans la branche de droite, l'autre dans la branche de gauche. Aussitôt, on verra le tournesol virer au rouge à l'électrode positive et au bleu à l'électrode négative, mais en plus, ce même phénomène se produira à la surface de séparation de la gélatine salée et de la gélatine non salée. Le bleu apparaît au point de passage du courant de la gélatine salée à la gélatine non salée, le rouge à l'autre surface de séparation.

Quand on décompose une solution par le courant, on observe le phénomène bien connu de la polarisation des électrodes, due à la mise en

liberté à la surface de ces électrodes des produits de décomposition. Cette polarisation se manifeste par une force électromotrice de sens inverse à celle qui produit le courant. Je me demandai si les effets que j'avais observés dans l'électrolyse interpolaire étaient aussi accompagnés d'une polarisation, ce qui établirait bien leur analogie avec les effets chimiques qui se passent aux électrodes. Divers auteurs, du Bois Reymond, entre autres avaient déjà cherché cette polarisation sans la trouver. Après avoir essayé différents procédés d'exploration, je m'arrêtai à une méthode imaginée par Chaperon et que je modifiai convenablement.

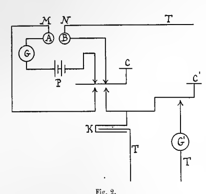


Fig. 2.

La figure 2, montre comment l'expérience doit être disposée. Deux cristallisoirs A, B, contiennent de l'eau salée physiologique. En plongeant les extrémités des tissus sur lesquels on opère dans ces deux critallisoirs, on y fait passer le courant fourni par une pile P. Le galvanomètre G donne l'intensité du courant. Abaissons la clef C, le courant est rompu. L'objet électrolysé se trouve maintenant dans le circuit de charge d'un condensateur K. M et N étant des électrodes impolarisables, le condensateur prendra une charge proportionnelle à la force électromotrice de polarisation des tissus. Au besoin, on donnera quatre ou cinq petits coups sur la clef C pour charger le condensateur K à refus. Ceci fait, on laisse remonter la clef C et on presse sur C', le condensateur se décharge à travers un galvanomètre balistique G', dont l'élongation est proportionnelle à la force électro-motrice de polarisation cherchée. On peut donc facilement évaluer la polarisation d'un tissu traversé par un cou-

rant d'intensité connue, et cela en dehors de ce qui se passe aux électrodes.

Je trouvai ainsi que les muscles se polarisent sur tout le trajet du courant, cette polarisation étant, pour une même intensité proportionnelle, à la longueur du muscle. Elle diminue quand la section du muscle augmente. Ce tissu se comporte donc comme s'il était composé de petites particules se polarisant et formant de petits accumulateurs disposés en séries de batteries.

Au cours des mêmes recherches, désirant étudier les divers phénomènes que peut produire le courant continu en passant à travers l'organisme, je vis que des courants extrêmement faibles donnaient lieu à des entraînements de matière faciles à mettre en évidence. Je m'adressai pour cela aux couleurs d'aniline dont on suit facilement la trace. Je coulai de la gélatine dans un tube en U, et j'imprégnai un anneau de cette gélatine avec diverses matières colorantes. Un courant de 1/25 de milliampère, passant dans un tube de un centimètre carré de section, suffisait pour donner lieu à un entraînement de la matière colorante de 6-7 centimètres par jour. Mais ce qui fut surtout remarquable, c'est que les couleurs basiques comme le bleu de méthylène, la vésuvine, le violet de Paris, etc., se déplaçaient dans le sens du courant, allant du pôle positif vers le pôle négatif, tandis que les couleurs acides, l'orangé, la fuchsine, l'éosine, allaient en remontant le courant du pôle négatif vers le pôle positif.

Sur une expérience de L. Hermann. — *Soc. de Biol.*, 19 fév. 1898.

Si l'on place un petit nerf dans de l'eau distillée et que l'on fasse passer un courant dans le liquide, dans le sens de la longueur du nerf, on voit le bout du nerf tourné vers l'anode se gonfler et les cylindre-axes se développer comme les tentacules d'une actinie qui s'ouvre. Le renversement du courant produit le mouvement inverse. Ce phénomène ne se passe pas dans l'eau salée, et Hermann en cherche la cause. Il s'agit ici d'électrolyse interpolaire se produisant à la surface de séparation du nerf et de l'eau distillée. Si l'on prend de l'eau salée, le courant passe mal par le nerf plus résistant que le milieu dans lequel il est plongé.

TITRE II

LA RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DU CORPS HUMAIN

J'ai publié sur cette question deux notes et un mémoire :

Choix de la méthode à employer dans les mesures de résistance du corps humain. — *Bulletin de la Société des Électriciens*, mars 1889.

La résistance du corps humain. — *Société de Biologie*, 10 juin 1893.

La résistance électrique du corps humain.
Archives d'électricité médicale, 1893.

Après avoir essayé divers procédés de mesure, les uns basés sur l'emploi du courant alternatif pour éliminer la polarisation, laquelle peut fausser les résultats, les autres sur l'emploi du courant continu, avec correction des erreurs dues à la polarisation, j'ai finalement adopté le dispositif suivant, pratique, permettant de faire rapidement des mesures, et que l'expérience m'a montré donner d'excellents résultats.

Deux grands vases de pile en grès V et V′ contiennent une solution d'eau salée à 1 pour 100. Un barrage fait avec trois baguettes de verre horizontales placées diamétralement dans chaque vase les unes au-dessus des autres, le partageait en deux compartiments, l'un antérieur dirigé du côté du sujet, l'autre postérieur.

C'est dans le compartiment postérieur que se trouvaient les électrodes amenant le courant.

Le sujet plongeait les mains ouvertes dans le compartiment antérieur.

Pour que l'immersion soit toujours à peu près la même, une petite barre de verre horizontale est fixée à mi-hauteur du vase, perpendiculairement à la cloison du barrage. Elle passera entre le médius et l'annulaire et la descente de la main sera ainsi limitée.

Les électrodes amenant le courant à l'eau salée sont constituées chacune

par une sorte de peigne dont le dos est un tube de verre et les dents de petits fils de platine, fins, espacés d'environ un centimètre, et de deux à trois centimètres de long. Le tube de verre est rempli de mercure pour établir la communication entre les dents et le fil conducteur venant du circuit et plongé dans le mercure. Chaque vase contient deux peignes de cette espèce.

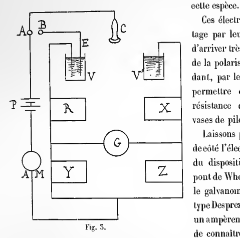


Fig. 3.

Ces électrodes ont l'avantage par leur petite masse, d'arriver très vite à la limite de la polarisation, et cependant, par leur étendue, de permettre de négliger la résistance du liquide des vases de pile.

Laissons pour le moment de côté l'électrode C, le reste du dispositif constitue un pont de Wheatstone, G étant le galvanomètre de zéro du type Desprez-d'Arsonval, AM un ampèremètre permettant de connaître l'intensité du courant traversant le corps au moment de la mesure, P une pile dont on pouvait varier à volonté le nombre des éléments. Y et Z sont deux résistances métalliques égales, X une résistance de 500 ohms environ dont on verra plus loin l'usage, R un rhéostat gradué ou une boîte de résistance. Le rhéostat vaut mieux car il se manie plus rapidement.

Supposons dès lors, que l'on veuille faire une mesure de résistance d'une main à l'autre. Le sujet commence par se laver soigneusement les mains à l'eau tiède, 35° à 40°, à la brosse et au savon, puis il vient prendre la position indiquée plus haut, l'eau des vases de pile étant ainsi à 35° environ. Le lavage préalable est indispensable, faute de le faire, les

erreurs les plus considérables peuvent s'introduire, par suite de matières plus ou moins grasses enduisant la peau.

Ceci étant, on ferme le circuit en AB à l'aide d'un cavalier plongeant dans deux petits godets à mercure. On fait monter l'intensité du courant au point où l'on veut faire la mesure et on ramène le galvanomètre G au zéro en agissant sur le rhéostat R. La résistance lue R moins X, c'est-à-dire moins 500 ohms, est la résistance cherchée.

Si l'on veut mesurer la différence de résistance entre les deux bras, ce qui m'a été nécessaire pour élucider certains problèmes, on retire le cavalier AB, on applique le tampon C sur la nuque et on opère comme précédemment. R-500 sera l'excès de résistance du bras côté V sur le bras côté V'. Il peut arriver que R soit inférieur à 500 ohms c'est alors le bras côté V' qui aura un excès de résistance de 500-R ohms.

C'est ce dernier procédé qui m'a permis de montrer, qu'en déplaçant une bande d'Esmarch du bras droit au bras gauche, on ne fait guère varier la différence de résistance entre les deux bras. Les nombres que j'ai trouvés sont tous compris entre 5 et 42 ohms. Comme l'effet est doublé, il en résulte donc qu'en mettant la bande d'Esmarch sur un bras on fait monter la résistance de 2,5 à 21 ohms environ. J'en ai conclu que ce n'est pas dans les variations de circulation qu'il faut chercher les changements de résistance bien plus importants que l'on observe. C'est aussi la même méthode qui m'a montré que la température de l'eau où l'on plonge les mains a une très grande importance. Il suffit en effet de faire baisser cette température de 30° à 5° pour voir la résistance du côté froid monter de 200 ohms environ.

Enfin supposons que l'on veuille mesurer la résistance du corps entre deux points symétriques, les deux coudes ou les deux épaules par exemple. On applique le tampon C sur l'épaule gauche et on fait la mesure, elle donne l'excès de résistance du bras droit, plus celle comprise entre les deux épaules sur la résistance du bras gauche. On fait la même opération en appliquant le tampon sur l'épaule droite. La différence des deux excès donne le double de la résistance qu'il y a entre les deux épaules. Remarquons que dans ce cas, le courant arrivant par l'électrode C ne se partage

entre les deux branches du pont qu'après avoir franchi la peau, et qu'on a la résistance cherchée entre les deux épaules indépendamment de la résistance cutanée.

J'ai pu voir par cette méthode que la résistance entre les deux épaules, ou entre les deux coudes, abstraction faite de la peau, est la même, 40 ohms et 250 ohms environ, chez des individus présentant une résistance très variable quand on emploie mon premier procédé, dans lequel entre l'influence de la peau.

C'est donc bien à la peau qu'il faut attribuer les variations de résistance du corps, les diverses méthodes que j'ai employées et les résultats obtenus nous conduisent toujours à cette même conclusion.

Dans toutes ces mesures la polarisation des électrodes n'intervient pas. On peut par une mesure de la polarisation interne corriger l'erreur qui en résulte, mais quelques essais m'ont fait voir que cette correction est négligeahle, et ne porterait que sur des écarts comparables aux erreurs générales d'expérience.

J'ai résumé dans la première partie de mon exposé les résultats que j'ai obtenus, je donnerai ici quatre tableaux numériques qui permettront mieux d'apprécier leur valeur.

Résistance d'une main à l'autre.

	RÉSISTANCES	ÉCARTS avec la moyenne		RÉSISTANCES	ÉCARTS avec la moyenne.
	HOMMES			HOMMES (*suite*).	
A	1150	— 165	P	1120	— 195
B	1380	+ 65	Q	1360	+ 45
C	1420	+ 105	Moyenne. .	1315	
D	1220	— 95			
E	1490	+ 175			
F	1290	— 25		FEMMES	
G	1130	— 185	R	1900	+ 383
H	1230	— 85	S	1390	— 127
I	1530	+ 215	T	1370	— 147
J	1350	+ 35	U	1400	— 117
K	1190	— 125	V	1600	+ 83
L	1280	— 35	X	1530	+ 13
M	1490	+ 175	Y	1430	— 87
N	1420	+ 105	Moyenne. .	1517	

Différence de résistance entre le côté gauche et le côté droit. Le signe + indique une supériorité du côté gauche. Ces mesures ont été faites sur les mêmes sujets que celles du tableau précédent.

HOMMES		HOMMES		FEMMES	
A	— 45	I	+ 50	R	+ 70
B	+ 30	J	+ 80	S	+ 35
C	— 30	K	+ 20	T	+ 10
D	+ 30	L	0	U	+ 40
E	0	M	+ 40	V	0
F	+ 40	N	— 30	X	0
G	+ 15	P	+ 10	Y	20
H	+ 30	Q	+ 30		

La différence de résistance entre les deux bras n'avait aucune relation avec le fait que le sujet pouvait être gaucher ou droitier.

Le tableau suivant qui montre dans quelles limites la résistance électrique d'un même sujet varie avec l'intensité du courant. D'après quelques auteurs cette variation serait énorme, il ne m'a pas semblé qu'il en soit ainsi.

L. M.		H. R.	
INTENSITÉ	RÉSISTANCE	INTENSITÉ	RÉSISTANCE
2,75	1550	5	1200
6	1250	6,50	1110
11,50	1170	10	1065
18,50	1145	19,50	1040
11,50	1160	9,50	1100
5,50	1210	5,50	1160
2,25	1260	2,25	1220

M. T.		G. W.	
INTENSITÉ	RÉSISTANCE	INTENSITÉ	RÉSISTANCE
4	1360	5	1570
15	1330	10	1350
24	1290	25	1160
12	1320	10	1260
5	1340	6	1510

Je faisais d'abord croître le courant puis décroître pour voir si la diminution de résistance constatée pour un courant plus fort persistait après retour à un courant plus faible. On voit qu'une telle persistance n'est pas notable.

Enfin le quatrième tableau donne les variations de résistance observées chez le même sujet à divers jours. Elles sont de même ordre que les variations observées d'un sujet à l'autre.

DATES	PRÉPARATEURS		GARÇONS	
	M. S.	M. M.	H. R.	L. M.
15 février 1895.	»	1150	»	»
15 —	1180	»	1060	1760
17 —	1460	»	1580	1620
21 —	»	1580	1160	1210
27 —	1090	1050	»	»
1er mars 1895.	1150	1110	1310	1250
2 —	»	1250	1520	1680
5 —	1080	1080	1510	1100
7 —	»	1250	1380	1680

TITRE III

LA LOI DE L'EXCITATION ÉLECTRIQUE DES NERFS ET DES MUSCLES

Pendant une grande partie de ma carrière scientifique, je me suis occupé de l'excitation électrique des nerfs et des muscles, et je me suis efforcé de rechercher quels étaient les facteurs dont dépendait cette excitation. Ce problème est en effet d'une importance fondamentale pour la physiologie du nerf et du muscle, comme je l'ai dit dans la première partie de mon exposé. Du jour où il sera résolu, nous ne pourrons pas savoir quelle est la nature de l'influx, mais nous serons en mesure de faire une élimination parmi les théories proposées.

Du Bois Reymond, le premier posa ce problème il y a plus de cinquante ans et consacra à sa solution les efforts de presque toute sa carrière. Il était arrivé à penser que l'excitation électrique d'un nerf ou d'un muscle est liée à la variation d'intensité du courant électrique traversant l'organe. Si on fait passer un courant continu, il n'y a pas d'excitation, ce n'est que s'il augmente ou diminue d'intensité, s'il commence ou finit, que le nerf entre en activité, ou que le muscle se contracte.

Nous ne connaissons aucun phénomène physique ou chimique lié à une loi pareille, si elle était exacte, la mise en activité du nerf ou du muscle serait une chose complètement différente de celles que nous connaissons d'après l'étude des corps non organisés. D'autre part, au moment où je commençai mes recherches, quelques savants pensaient que c'était l'énergie de la décharge qui était le facteur d'excitation. Boudet de Pâris, un des premiers, avait soutenu cette opinion qui comptait, il y a peu d'années encore, bien des partisans à l'étranger.

Moi-même, pendant longtemps, tantôt à l'aide de condensateurs, tantôt avec d'autres dispositifs, je fis de vaines expériences pour élucider cette question.

Entre autres, je construisis un appareil à chute, où un balai passait en frottant sur un collecteur à lames parallèles isolées les unes des autres. Ces lames étaient reliées à diverses parties d'un circuit parcouru par un courant, elles pouvaient ainsi être maintenues à un potentiel variable suivant la lame, mais connu, et, lorsque le balai passait sur elles en frottant on obtenait dans un circuit dérivé, dont une extrémité se trouvait au balai et l'autre à terre, une onde de forme connue. Je cherchai à relier les conditions d'excitation à ces formes d'onde, mais je n'y parvins pas, pour des raisons que je comprends aujourd'hui et dont l'une est que les ondes n'étaient pas assez rapides; elles n'étaient pas entièrement utilisées pour l'excitation.

Il est inutile d'insister d'avantage ici sur toutes les hypothèses émises au sujet de ce problème, et plus ou moins étayées sur des expériences variées.

Finalement, j'arrivai à un dispositif expérimental convenable et je pus établir la loi connue sous mon nom.

Mes expériences ont été répétées dans plusieurs laboratoires à l'étranger; M. et Mme Lapicque les ont étendues à d'autres animaux que ceux sur lesquels j'avais moi-même opéré et les ont prises comme point de départ de recherches importantes. M. Cluzet, de Toulouse, s'en est servi pour faire une étude très intéressante de l'excitation par les décharges de condensateur, d'où il résulte que la plupart des conclusions tirées de l'emploi du condensateur sont erronées. Mme Lapicque et M. Cluset ont fait de ces sujets l'objet de leur thèse de doctorat ès-sciences, et aujourd'hui la loi que j'ai formulée est classique en France et à l'étranger.

Avant d'exposer comment je suis arrivé à établir cette loi, j'énumérerai les publications que j'ai faites sur l'excitation des nerfs et des muscles au cours de mes recherches.

Excitation des nerfs et des muscles.
Société de Physique, 19 juin 1891.

Excitation des nerfs et des muscles.
Société d'Électrothérapie, 1892.

La caractéristique d'excitation des muscles et des nerfs.
Comptes rendus de l'Acad. des Sciences, 29 novembre 1897.

La caractéristique d'excitation des muscles et des nerfs.
Archives de Physiologie norm. et Path., 1898.

L'excitation électrique. — *Archives d'Électricité médicale*, 1898.

Du choix d'un système de mesures dans l'étude de la contraction musculaire. — *Arch. d'Électricité médicale*, 1898.

Interrupteur balistique. — *Société de Biologie*, 9 mars 1901.

Recherches sur l'excitation des nerfs par les courants de très courte durée. — *Société de Biologie*, 9 mars 1901.

Excitation du nerf par deux ondes électriques successives et très courtes. — *Société de Biologie*, 20 avril 1901.

Excitation des nerfs et des muscles par des ondes de très courte durée.
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 22 avril 1901.

Rôle de la quantité d'électricité dans l'excitation des nerfs.
Société de Biologie, 27 avril 1901.

Recherches sur les constantes physiques qui interviennent dans l'excitation électrique du nerf.
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 29 avril 1901.

La loi de l'excitation électrique des nerfs.
Société de Biologie, 4 mai 1901.

La loi de l'excitation électrique des nerfs.
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 6 mai 1901.

Sur la généralité de la loi d'excitation des nerfs.
Société de Biologie, 18 mai 1901.

La formule générale de l'excitation électrique et la réaction de dégénérescence. — *Société de Biologie*, 8 juin 1901.

Recherches sur la nature de l'excitation électrique.
Société de Biologie, 22 juin 1901.

Excitation produite par deux ondes inverses l'une de l'autre.
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 22 juillet 1901.

Sur la possibilité de rendre comparables entre eux les appareils servant à l'excitation électrique.
Arch. Ital. de Biologie, vol. XXXV.

A propos de l'article de M. Hoorweg « sur l'excitation électrique des nerfs ».
Arch. Ital. de Biologie, vol. XXXVII.

Excitation électrique du nerf par deux ondes très courtes. de sens inverses. — *Journal de la Physiologie et de la Pathologie*, 1902.

Sur l'excitation électrique des nerfs.
Journal de la Physiologie et de la Pathologie, 1903.

A propos de l'excitation électrique des nerfs et des muscles.
Société de Biologie, 8 juillet 1903.

Hoorweg, Cybulski et Zanietowski, Waller, d'autres encore avaient établi un fait remarquable. Quand on excite un nerf ou un muscle par la décharge d'un condensateur, en faisant varier la capacité et le potentiel de charge de façon à rester toujours au seuil de l'excitation, à mesure que cette capacité croît l'énergie de la décharge va en diminuant, puis passe par un minimum pour augmenter ensuite. Il y a donc une capacité optima.

J'ai repris ces expériences et retrouvé le même phénomène.

Exemple d'expérience :

16 *novembre* 1900. — **Décharge descendante, les électrodes étant écartées de 8 millimètres. — Résistance du nerf 56 000 ohms. — Électrodes 6000 ohms. — Reste du circuit 740 000 ohms. — Rana esculenta.**

C EN MICROFARADS	VOLTS	ERGS
0,0003	3,94	0,0232
0,0004	2,99	0,0178
0,0005	2,51	0,0157
0,0007	2,08	0,0151
0,001	1,79	0,0160
0,002	1,51	0,0172
0,005	1,10	0,0302
0,01	0,98	0,0480
0,02	0,93	0,0865
0,2	0,68	0,4624

Mais dans toutes ces expériences il y avait un facteur dont on ne faisait pas état, c'était la durée pendant laquelle le nerf ou le muscle était soumis à l'excitation, et je résolus d'étudier l'influence de ce facteur en utilisant des décharges de durée connue et variable à volonté. Comme évidemment la décharge devait, pour être utilisée en entier, se produire complètement dans la période latente du muscle, laquelle est au maximum de 0″ 0025, il me fallait un interrupteur très précis et très rapide pour faire passer dans le muscle des décharges de durée variable et connue, mais inférieure à 0″0025. Il ne pouvait être question de fermer un circuit et de le rompre ensuite : on n'est jamais certain du moment précis où un circuit se ferme. Après quelques essais, j'adoptai le dispositif suivant :

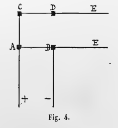


Fig. 4.

Un distributeur de potentiel est relié à deux bornes AB. A est relié à C. De B et de D partent les fils allant aux électrodes.

Relions maintenant CD d'une part, AB de l'autre, par des fils de cuivre

très fin. Comme le circuit des électrodes est très résistant, il n'y passe aucun courant appréciable, à cause du shunt AB.

Mais si l'on rompt AB, le courant commence au moment précis de la rupture. Si ensuite on rompt CD, le circuit des électrodes est interrompu et le courant cesse instantanément. Il a donc passé pendant l'intervalle des deux ruptures. Ces ruptures étaient obtenues dans mon dispositif par une balle lancée par une carabine à acide carbonique liquide, dont la vitesse était de 135 mètres à la seconde. Un centimètre de course correspondait à 0″000077. En espaçant plus ou moins les fils, ce qui se faisait par un dispositif simple facile à imaginer, je graduais à volonté la durée des excitations. Un voltmètre relié au distributeur de potentiel donnait à chaque instant la valeur du voltage, et par suite, comme la résistance restait constante pendant la durée d'une expérience, la valeur du courant traversant le nerf.

Il y avait une vérification importante à faire. Il fallait savoir si la période variable d'établissement du courant ne risquait pas de troubler mes résultats. Des expériences préliminaires faites avec un galvanomètre balistique très sensible me rassurèrent à cet égard, et montrèrent que la quantité d'électricité fournie par chaque décharge était proportionnelle à la distance des fils.

Les résultats que je donnerai dans la suite ne sont pas exprimés en unités absolues : je renonçai bientôt à cette détermination qui n'avait pour moi aucun intérêt, étant donné le but que je poursuivais, et me prenait beaucoup de temps au cours d'expériences déjà très laborieuses, dans lesquelles je ne pouvais me faire aider, tenant à recueillir moi-même tous les résultats numériques.

Je commençai par comparer entre elles les quantités d'énergie des diverses décharges et je trouvai un optimum pour lequel le nerf répond à un minimum d'énergie. Cela correspond à ce qui avait été vu avec le condensateur.

18 *décembre* 1900. — **Rana esculenta. — Distance des Électrodes 21mm. — Résistance approximative du circuit 590 000 ohms. — Excitation descendante.**

DURÉE DU PASSAGE	VOLTAGE	ÉNERGIE
6	147	1296
8	124	1250
10	110	1210
12	94	1083
16	81	1049
20	73	1065
30	62	1153
40	57	1299

Mais M. Lapicque fit à mes expériences une objection grave. Rien ne prouvait que l'excitation se fasse pendant toute la durée de passage de la décharge. Elle pouvait n'avoir lieu qu'au moment de la fermeture et de la rupture, et toutes les considérations sur les décharges de diverses durées devenaient vaines, les phénomènes observés tenaient à une action réciproque des excitations de fermeture et de rupture.

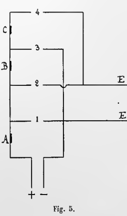


Fig. 5.

Je résolus de lever cette objection de la façon suivante :

Si une décharge, de la forme de celles que j'employais, devait ses propriétés excitatrices à la période de fermeture et de rupture, en faisant au milieu de cette décharge une interruption, on augmentait son action. Si, au contraire, l'excitation était liée à la durée de passage, cette opération devait diminuer l'action. Je modifiai mon dispositif comme l'indique la figure 5. A, B, C représentent des résistances sans capacité ni self-induction; 1, 2, 3, 4, des fils de rupture.

Il est aisé de voir que les quatre fils étant en place il ne passe aucun courant par les électrodes. Ce passage commence quand on rompt 1 et prend une valeur réglée par celle des résistances. On retombe à 0 quand on rompt 2. Puis le courant reprend une certaine valeur quand on rompt 3, pour cesser à la rupture de 4.

On a donc deux passages successifs séparés par un intervalle. La durée des passages et de l'intervalle se détermine par la distance des fils; la grandeur des courants, par un réglage des résistances.

Si au début on ne met en place que les fils 1 et 4, on a une durée de passage égale à la totalité des passages et de l'intervalle de l'expérience précédente.

On pourrait déterminer les intensités par le calcul, mais il vaut mieux, à la fin de chaque série d'opérations, les déterminer expérimentalement en faisant passer le courant dans un galvanomètre étalonné placé sur le trajet des électrodes, et mettant aux points convenables des cavaliers de contact au lieu de fils de rupture.

Je vis ainsi, immédiatement, que toute interruption sur une décharge diminuait la valeur excitatrice de cette décharge. Si l'on se trouve au seuil de l'excitation pour une décharge entière, il faut, quand on fait une interruption sur la décharge, élever la valeur de l'intensité du courant pour retrouver le seuil.

Dans quel rapport faut-il ainsi faire cette élévation? Je cherchai d'abord si l'énergie totale dépensée dans le même temps doit rester la même. Il n'en était rien, mais bientôt je vis que c'était la quantité d'électricité mise en jeu qui restait constante. Cela ressort des deux tableaux suivants, où je compare, dans chaque ligne horizontale, une onde unique à une onde interrompue. Sous la rubrique « Formule » je donne la durée d'une onde unique, ou bien la durée de la première onde, de l'intervalle et de la seconde onde, la somme du tout étant égale à la durée de l'onde unique de la même ligne. Si un chiffre est souligné, cela veut dire que l'onde correspondante est plus haute. Ainsi 3, 2, $\underline{3}$, veut dire une onde de durée 3, un intervalle 2 et une onde 3 d'intensité plus grande que la première. En comparant les quantités d'énergie mises en jeu, on voit

qu'elles sont très différentes, tandis que les quantités d'électricité sont les mêmes.

Tableau A

ONDES UNIQUES				ONDES INTERROMPUES			
FORMULE	VOLT	Q	E	FORMULE	VOLT	Q	E
8	128	1024	121.000	3.2.3	170	1020	173.000
8	105	840	88.000	3.3.3	150	900	135.000
12	85	1020	87.000	3.2.3	105	1050	110.000
8	90	720	65.000	3.2.3	134	804	108.000
8	78	624	49.000	3.2.3	108	648	70.000
30	50	1500	75.000	10.10.10	71	1420	101.000
27	60	1620	97.000	9.9.9	87	1560	136.000
24	59	1416	83.000	8.8.8	86	1376	118.000
21	68	1428	97.000	7.7.7	96	1344	129.000
18	69	1242	86.000	6.0.0	99	1188	118.000

Tableau B

ONDES UNIQUES				ONDES INTERROMPUES			
FORMULE	VOLT	Q	E	FORMULE	VOLT	Q	E
8	104	832	86.000	3.2.3	146	806	109.000
8	72	576	41.000	$3.2.\overline{3}$	86	584	57.000
9	96	864	83.000	$\overline{3}.3.3$	88	778	112.000
7	108	756	82.000	$\overline{3}.1.3$	80	708	92.000
7	97	679	66.000	$\overline{3}.1.3$	125	686	79.000
7	59	413	24.000	$3.1.\overline{3}$	87	386	32.000
8	33	264	9.000	$4.2.\overline{2}$	60	252	12.000
8	30	240	7.000	$2.2.\overline{4}$	42	260	8.000
8	63	504	32.000	$4.2.\overline{2}$	56	464	37.009
8	63	504	32.000	$\underline{2}.2.4$	75	522	34.000

Il s'agissait maintenant de voir comment variait la quantité d'électricité quand la durée de la décharge variait. Je repris mes expériences précédentes sur les ondes uniques, et je les reportai sur des graphiques. Immédiatement la loi linéaire apparut, et je vis que tous les résultats d'une même série pouvaient se représenter par une formule $Q = a + bt$, a et

b étant des constantes dépendant des conditions de l'expérienee. Mes recherches ultérieures ne firent que confirmer eette règle.

Voici un exemple destiné à montrer la eoneordanee existant entre les valeurs de Q mesurées direetement et eelles ealenlées par la formule $Q = 227 + 21\ t$.

DURÉE DU PASSAGE	Q MESURÉ	Q CALCULÉ
6	882	881
8	992	963
10	1100	1045
12	1134	1127
16	1304	1291
20	1460	1455
30	1860	1865
40	2280	2275

C'est alors que je formulai la loi suivante :

Quand on excite électriquement un nerf ou un muscle par une décharge unique assez courte pour tomber dans la période latente, cette décharge amène le nerf ou le muscle au seuil de l'excitation quand elle met en jeu une quantité d'électricité constante, plus une quantité proportionnelle au temps pendant lequel la décharge agit.

Tout se passe comme s'il fallait une quantité constante d'électricité pour produire l'excitation, mais que, le phénomène ayant une tendance permanente à régression, il faille en même temps combattre cette régression par une quantité complémentaire constante par unité de temps.

L'excitation électrique est donc un phénomène lié à la quantité d'électricité de la décharge.

C'est là un point de départ pour les recherches ultérieures sur la nature de l'influx nerveux.

On verra plus loin que d'autres recherehes faites par moi resserrent eneore le champ des hypothèses.

M. Hoorweg m'a opposé une formule générale permettant de ealculer l'effet d'excitation d'une décharge électrique, et dont la mienne se déduirait directement. J'ai fait remarquer que cette déduction néeessiterait certaines

hypothèses qui sont loin d'être évidentes. La vérification de l'une d'elles a fait l'objet de la thèse de doctorat ès sciences de M. Cluzet, et, comme je le prévoyais, elle s'est trouvée fausse. De plus, j'ai voulu montrer que la formule générale de M. Hoorweg était elle-même inexacte ; pour cela, je l'ai appliquée au cas où l'excitation se fait par deux ondes successives inverses l'une de l'autre représentées schématiquement sur la fig. 6.

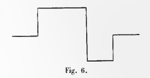


Fig. 6.

Pour obtenir une pareille onde, je me suis servi d'un interrupteur à trois fils auquel j'ai relié mon circuit suivant le schéma de la figure 7. C'est en somme un dispositif en pont de Wheatstone, et il est aisé de voir qu'avec un réglage convenable des résistances *a*, *b*, *r*, *r'*, la rupture des fils dans l'ordre 1, 2, 3 donne des ondes de la forme que je viens d'indiquer.

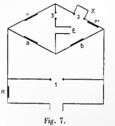


Fig. 7.

J'ai alors appliqué la formule de M. Hoorweg et j'ai trouvé, qu'en passant d'une onde alternée + 20 — 10 à une autre onde alternée — 10 + 20, l'intensité dans le second cas devrait être cinq fois plus forte que dans le premier, pour amener un nerf au seuil de l'excitation.

L'expérience prouva qu'il n'en était rien et qu'il fallait la même intensité dans les deux cas, que l'onde — 10 précède ou suive l'onde + 20. Un pareil écart ne peut tenir aux erreurs d'expérience, la formule de M. Hoorweg est donc inexacte.

Actuellement, du reste, la loi que j'ai formulée n'est plus discutée.

TITRE IV

RECHERCHES DIVERSES
SUR LA PHYSIOLOGIE DU NERF ET DU MUSCLE

***

Sur la hauteur de la contraction musculaire aux diverses températures. — *Société de Biologie*, 15 juillet 1899.

Influence de la température sur la hauteur du tétanos expérimental. — *Société de Biologie*, 22 juillet 1899.

Influence de la température sur la contraction musculaire de la grenouille. — *Journal de la Physiologie et de la Pathologie*, 1900.

Ces recherches ont été faites en collaboration avec M. Carvallo. Comme technique, elles n'offrent rien de particulièrement saillant ; quant aux résultats, ils ont été donnés dans la première partie de l'exposé.

***

Influence de la température sur la fatigue et la réparation du muscle. — *Société de Biologie*, 8 juillet 1899.

Influence de la température sur la disparition et la réapparition de la contraction musculaire. — *Journal de la Physiologie et de la Pathologie*, 1899.

(En collaboration avec M. Carvallo).

Si, faisant des excitations toutes les 6-7 secondes, on trace la courbe de fatigue d'un muscle pourvu de sa circulation, on constate qu'il présente un maximum de résistance entre 20° et 25° environ. Mais la fatigue ne se présente pas de la même façon au-dessus et au-dessous de ce maximum. Au-dessus, plus la température s'élève, plus le muscle s'épuise rapidement, mais il se répare aussi difficilement. Au-dessous, il se répare plus facilement et à très basse température, à zéro, présente un phénomène

extrêmement remarquable. Si, sur un muscle pourvu de sa circulation et plongé dans la glace, on trace une courbe de fatigue, on le voit s'épuiser rapidement : quinze à vingt minutes suffisent pour

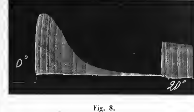


Fig. 8.

cela. Quand il ne répond plus à aucune excitation, chauffons le muscle en versant sur lui de l'eau à 15 ou 20° qui chassera la glace dont on l'avait entouré. Instantanément on voit les secousses reprendre une certaine amplitude, comparable à celles du début. Cet effet est représenté sur la figure 8. On peut faire la même expérience plusieurs fois sur le même muscle. On obtient les mêmes résultats sur le muscle anémié, mais dans les reprises successives, la fatigue se fait de plus en plus sentir. Le tracé 9 représente une expérience faite dans ces conditions.



Fig. 10.



Fig. 9.

Une élévation de température produit le même effet que le travail du muscle. Considérons le tracé 10, voici à quoi il correspond. On a inscrit trois secousses sur un muscle à 20° environ, puis laissant le muscle au repos on a élevé la température à 30°, et au bout de dix minutes on a brusquement plongé le muscle dans la glace : à la suite de cette opération il était absolument inexcitable.

Mais il a suffi de le porter de nouveau à 20° pour obtenir une série de secousses ; finalement, en le refroidissant de nouveau à 0°, on a la courbe de fatigue que l'on observe en pareil cas.

Enfin, si l'on maintient un muscle à 0°, longtemps, sans le faire travailler, il perd la faculté de se contracter, mais il suffit encore de le réchauffer pour la lui rendre.

Tout se passe donc comme s'il y avait dans le muscle un certain produit indispensable à la production du travail, ce produit s'usant, soit par la mise en action du muscle, soit même au repos, plus vite à haute température qu'à basse température, mais ne pouvant se reformer à 0°.

***

Influence des variations de température sur les périodes latentes du muscle, du nerf et de la moelle.
Société de Biologie, 20 janv. 1900.

Sur la nature de la propagation de l'influx nerveux.
Comptes rendus de l'Acad. des Sciences, 22 janv. 1900.

Sur la propagation d'une excitation depuis le haut de la moelle jusqu'au muscle.
Société de Biologie, 3 fév. 1900.

L'excitabilité du nerf, sa conductibilité et la structure du cylindre-axe.
Société de Biologie, 24 mars 1900.

Influence paradoxale de l'acide carbonique sur le nerf moteur de la grenouille.
Société de Biologie, 12 mai 1900.

Influence de la température sur la conduction du nerf.
Société de Biologie, 6 déc. 1902.

La conductibilité et l'excitabilité des nerfs.
Journal de la Physiologie et de la Pathologie générale, 1903.

Influence des variations de température et des actions mécaniques sur l'excitabilité et la conductibilité des nerfs.
Journal de la Physiologie et de la Pathologie générale, 1903.

Comme je l'ai dit dans la première partie de mon exposé, en étudiant l'influence du refroidissement du nerf sur la forme de la secousse musculaire, Helmholtz avait été induit en erreur par la protection, insuffisante, contre le refroidissement du muscle sur lequel il opérait. En garantissant ce muscle contre tout rayonnement par des écrans en liège, et le plaçant sur un support isolé de celui sur lequel se trouve le nerf, pour éviter les erreurs de conductibilité, on ne constate aucun changement dans la forme de la secousse, résultant de l'échauffement ou du refroidissement du nerf.

Je recherchai alors si les variations de température influaient sur la vitesse de propagation de l'influx nerveux. Après avoir employé un dispositif consistant à enregistrer le moment de l'excitation et le commencement de la réponse du muscle, je m'arrêtai à une modification de la méthode de Pouillet qui me permit d'obtenir des résultats extrêmement précis.

L'ensemble de mon appareil est représenté schématiquement sur la figure 11.

A représente un accumulateur dont le courant peut traverser le primaire de la bobine d'induction B quand on ferme le circuit en 1. Le circuit secondaire peut être lui-même fermé ou rompu en 3. R et R′ sont des résistances permettant de régler la sensibilité du galvanomètre balistique G, et ayant aussi un autre but : quand le circuit de l'accumulateur est fermé en 1 et 2, un courant assez intense traverse le primaire de la bobine B ; si l'on retire le cavalier 2 ou introduit dans ce circuit une résistance complémentaire dépendant des valeurs de R et R′ ; il se produit donc une onde induite dans le secondaire de B, onde induite servant à

exciter le nerf ou le muscle sur lequel on opère. Si au commencement de l'opération une pointe de platine suspendue au muscle a été amenée au contact de la surface de mercure M, un courant traverse le galvanomètre G depuis le moment où l'on a retiré la clef 2 jusqu'au moment de la rupture en M. Le galvanomètre G donne des élongations proportionnelles à cette durée, que l'on peut mesurer en valeur absolue si l'on a préalablement étalonné l'appareil. Cet étalonnage se fait grâce à un interrupteur à chute pouvant se mettre en place de M et donnant passage au courant pendant deux centièmes de seconde.

Si les résistances R et R' sont bien réglées, on n'a aucune étincelle de rupture ni en M, ni à l'interrupteur à mercure 2. On peut mesurer plusieurs fois de suite un même intervalle de temps sans observer de différences appréciables sur l'échelle transparente où se lit l'élongation du galvanomètre G.

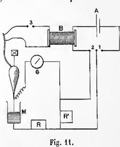


Fig. 11.

L'appareil à chute destiné à l'étalonnage et un shunt pour ramener rapidement au zéro le galvanomètre G à champ magnétique fixe ne sont pas représentés sur la figure.

Pour faire une expérience, on règle l'affleurement du mercure en M avec une vis micrométrique, on place les cavaliers 1, 2, puis 3. Enfin, on retire brusquement 2. Comme après chaque secousse le muscle conserve un certain temps un raccourcissement résiduel, le contact en M ne se refait pas, et on n'a qu'à lire l'élongation de G.

Ceci étant, j'ai voulu profiter de mon installation pour rechercher si la vitesse de propagation de l'influx nerveux était constante le long d'un nerf, ou bien si elle allait en diminuant ou en augmentant comme le soutenaient certains auteurs.

J'ai placé le nerf moteur d'un muscle sur trois paires d'électrodes, 1, 2, 3, la première à la partie supérieure du nerf, la troisième à la partie

inférieure, contre le muscle, et la deuxième au milieu des deux précédentes. En mesurant les périodes latentes accompagnant l'excitation successive par ces trois électrodes, j'ai pu en déduire la vitesse de propagation entre 1 et 2, et celle entre 2 et 3. J'ai trouvé comme moyenne de dix expériences :

Entre 1 et 2 . . . . 26m,2 par seconde.
Entre 2 et 3 . . . . 28m,8 —

L'écart entre ces deux vitesses est minime et tombe dans les limites des erreurs inévitables dans de pareilles expériences.

J'arrive maintenant à l'influence de la température.

La première mesure de période latente par excitation du nerf se faisait à 23 degrés, puis, en protégeant bien le muscle, on entourait avec de la glace le nerf placé dans un petit tube de cuivre, et on recommençait la mesure, puis on revenait à 23 degrés, à 0 degrés, et ainsi de suite alternativement.

Voici un résultat d'expérience :

	Élongation à 0°.	Élongation à 23°.
	388	386
	387	386
	382	385
	380	385
	383	382
Moyenne. . .	384,0	384,8

Variation relative : 0,02.

Le nerf restait à chaque expérience environ trois ou quatre minutes à la température à laquelle on désirait opérer, avant que la mesure se fasse.

Cherchons maintenant comment se comporte la période latente réflexe de la moelle d'une grenouille.

La grenouille étant en place, le gastrocnémien droit étant relié à l'aiguille de platine, l'excitation sera portée sur le bout central du sciatique gauche sectionné. La grenouille a d'ailleurs reçu préalablement 1/50 de

milligramme de strychnine, sans quoi le réflexe ne se produirait pas, puis elle a été décapitée.

La première mesure se fait à 17 degrés et l'on trouve 0",0104.

On place sur le dos de la grenouille un petit fragment de glace.

Glace à		3h,35.	
1re mesure		3h,37	0"',0162
2e	—	»	0",0186
3e	—	»	0",0200
4e	—	»	0",0215
5e	—	3h,40	0",0228

La même augmentation rapide de la période latente s'observe sur le muscle.

On voit donc qu'il n'y a aucune comparaison à faire entre l'action de la température sur la propagation de l'influx nerveux et sur la fonction de la moelle et du muscle. Il y a une différence capitale entre la nature de ces phénomènes.

Si, au lieu de provoquer une secousse musculaire par voie réflexe, on excite le sommet de la moelle, immédiatement au-dessous du bulbe on constate que le parcours de cette excitation dans la moelle prend un temps considérable, de même ordre que le réflexe de la moelle. Cette propagation est influencée par la température. Mais, en portant graduellement l'excitation de plus en plus bas, on arrive souvent presque brusquement à un point à partir duquel la vitesse de propagation est comparable à celle du nerf, aussi bien comme grandeur que comme indépendance de la température.

Je ne reviendrai sur le phénomène que j'ai signalé à propos de l'action de l'acide carbonique sur le nerf que pour donner un exemple.

Le muscle étant préparé avec son nerf moteur, ce nerf traversait deux petits compartiments étanches où il reposait sur des électrodes, 1 étant la paire du compartiment le plus rapproché du muscle, 2 la paire du compartiment le plus éloigné.

Temps.	Excitabilité à la paire 1.	Excitabilité à la paire 2.
Nerf entier dans l'air.		
2h,50	15,75	17,75
A 2h,52 on fait passer CO^2 dans le compartiment 1 seulement.		
3h »	13 »	17,50
3h,10	13 »	»
On chasse CO^2 par un courant d'air.		
3h,20	14,25	17 »
On fait passer CO^2 dans les deux compartiments.		
3h,30	13 »	9 »
4h »	12,75	9 »
4h,30	12,75	9 »
5h »	9 »	9 »
5h,10	9 »	8,75

On voit que dans le premier cas en moins de dix minutes la conductibilité a été coupée entre les électrodes supérieures et le muscle ; dans le second, elle persistait au bout de près de deux heures. Remarquons aussi que le contact direct de l'acide carbonique avec le point d'excitation produit une chute brusque de l'excitabilité dès le début même.

J'ai recommencé souvent cette expérience avec le même résultat, mais sans pouvoir l'interpréter.

Ranvier, se basant sur deux expériences où il avait vu le nerf dégénérer plus rapidement chez les animaux robustes que sur des animaux affaiblis, a admis que la dégénération wallérienne du nerf sectionné est un phénomène actif et non un simple dépérissement comme celui qui accompagne la mort de l'animal.

Si l'idée de Ranvier est exacte, il faut en conclure que la dégénération wallérienne se produira d'autant plus rapidement sur un animal que les échanges de l'organisme sont eux-mêmes plus actifs.

Pour élucider ce point j'ai fait trois lots de grenouilles, je leur ai sectionné le sciatique et j'ai conservé le premier lot à une température de

16° environ, le second entre 8°-10° et le troisième dans une glacière.

La figure 12, représente la chute de l'excitabilité du nerf dans ces trois cas. Sur le premier lot l'excitabilité commençait à baisser au bout du 7e jour pour devenir nulle le 13e. A ce moment la dégénérescence était suffisante pour rompre la conductibilité du nerf. Mais, à cette époque, sur les gre-

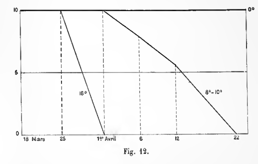


Fig. 12.

nouilles du second groupe la conductibilité était encore normale, et il fallut 35 jours pour que la dégénérescence ait lieu. Enfin sur les grenouilles de la glacière je ne pus jamais constater de chute de l'excitabilité.

Influence de la tension sur l'excitabilité du nerf.

Soc. de Biologie, 11 fév. 1899 et *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, 13 fév. 1899.

L'excitabilité directe du muscle est plus grande quand ce muscle est légèrement tendu que lorsqu'il est complètement relâché. En est-il de même pour le nerf? J'ai préparé une patte de grenouille en isolant le nerf et séparant ensuite cette patte du corps un peu au-dessus du genou. Cela fait, je l'ai fixée sur une plaque de liège verticale de façon que le tibia soit vertical, le pied étant dirigé vers le haut. Le nerf pendait alors librement. A ce nerf je fixai un petit crochet de platine ne pesant que 0gr,066 et je cherchai le seuil de l'excitation. Quand je forçais un peu cette excitation, les muscles de la patte donnaient une bonne secousse, dans ces

conditions il me suffisait d'ajouter au crochet de platine un poids supplémentaire de $0^{gr},87$ pour voir la secousse disparaître.

Elle reparaissait au contraire chaque fois que je retirais le petit poids supplémentaire.

Un nerf légèrement tendu est donc moins excitable qu'un nerf qui ne l'est pas. Ce résultat, contraire à ce qu'avaient trouvé avant moi tous les expérimentateurs qui s'étaient occupés de cette question, s'est trouvé vérifié depuis.

Recherches sur l'influence réciproque de deux excitations portées en deux points différents d'un nerf.

Société de Biologie, 18 janv. 1902.

Mon interrupteur balistique me permet, avec une grande précision, de lancer deux ondes électriques se suivant à un intervalle déterminé. Dans mes précédentes recherches je conduisais ces deux ondes à une même paire d'électrodes, mais il est aussi facile de les faire aboutir à deux paires d'électrodes différentes.

Je puis donc exciter le nerf en deux points différents de son parcours choisis à volonté, l'excitation portée en chacun de ces points ayant la grandeur que l'on désire et étant séparée de l'autre par un intervalle de temps que l'on peut déterminer à son gré.

Ce sont les conditions requises pour pouvoir faire interférer les deux excitations, si une pareille interférence existe.

J'ai eu beau varier mes conditions d'expérience, en me guidant au besoin sur d'autres travaux déjà exécutés sur ce sujet, jamais je n'ai pu observer d'interférences nerveuses.

Les plaques terminales motrices sont-elles indépendantes les unes des autres? — *Société de Biologie*, 1er mars 1902.

J'ai dit dans la première partie de mon exposé quel est le problème que je me suis posé. Je me contenterai donc de décrire la méthode que j'ai employée.

Le gastrocnémien de la grenouille est innervé par la IXe et la Xe paire rachidienne. Les fibres musculaires de ce gastrocnémien reçoivent des terminaisons motrices de l'une ou de l'autre de ces racines. Supposons pour le moment qu'il n'y ait aucune communication entre les diverses terminaisons motrices. Si l'on excite la racine IX, certaines fibres du muscle se contracteront; si l'on excite la racine X, ce sont les autres. Or, relions le gastrocnémien à un petit dynamomètre, portons un courant tétanisant sur IX et mesurons la force de traction du muscle; soit f cette force. Recommençons sur X et soit f' la force de traction correspondante. Tétanisons maintenant simultanément IX et X, tout le muscle se contractera et nous aurons une force de traction F évidemment égale à $f + f'$.

Supposons au contraire qu'il y ait des communications fonctionnelles entre les plaques terminales, quand on excitera IX on provoquera le tétanos d'un plus grand nombre de fibres que celui prévu dans le cas précédent, on aura une force de traction f_1. Quand on excitera X, on aura aussi une force plus grande f', soit f'_1. Il en résultera que F sera plus petit que $f_1 + f'_1$.

Pour permettre d'apprécier le résultat obtenu, le mieux est de donner le tableau de mes espériences faites sur Rana esculenta.

PATTE DROITE				PATTE GAUCHE			
IX	X	IX ET X	SOMME IX + X	IX	X	IX ET X	SOMME IX + X
24	30	44	54	13	42	45	55
16	32	41	48	16	29	38	45
35	26	47	61	37	28	50	65
22	48	57	70	17	56	57	73
22	33	47	55	26	28	51	54
48	13	54	61	53	13	57	66
22	35	49	57	19	49	53	68
25	32	49	57	20	38	49	58
20	24	40	44	24	25	41	47
23	21	36	41	22	29	45	51

On voit que toujours la somme des tractions obtenues en excitant séparément la racine IX et la racine X est supérieure à la traction totale que le

muscle peut exercer. Il semble donc qu'il y ait quelques communications entre les diverses terminaisons motrices, mais ces communications sont assez restreintes et très variables d'un sujet à l'autre.

On pouvait se demander si en excitant une des racines, IX par exemple, l'excitation ne se transmet pas à l'autre par diffusion ou par suite du courant d'action de la racine excitée. J'ai levé ces objections et montré qu'il n'en était rien. La seconde surtout était grave et difficile à réfuter. Voici comment cela peut se faire. Le sciatique se bifurque un peu avant d'arriver au genou. Coupons le plus bas possible la branche qui ne va pas au gastrocnémium et excitons le bout central. Si le courant d'action qui s'y développe peut exciter le sciatique au point où les deux branches se rejoignent, on verra immédiatement le gastroenémien se contracter. Or il n'en est rien : il n'y a donc pas à craindre cette cause d'erreur.

Études sur le fuseau neuro-musculaire.

Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 28 nov. 1895. *Comptes rendus de la Société de Biologie*, 14 mars 1896. *Journal de la Physiologie norm. et path.*, 1896.

(En collaboration avec M. Duthil.)

Au cours de recherches sur le développement de la contractilité musculaire et de l'excitabilité du nerf chez l'embryon, notre attention a été attirée par divers organes qui se trouvaient dans nos préparations. Les uns étaient des terminaisons tendineuses, les autres des fuseaux neuro-musculaires. Ces fuseaux neuro-musculaires avaient été vus par un grand nombre d'auteurs et décrits par eux sous des noms variés. Ils avaient été pris du reste successivement pour des productions pathologiques, des plaques motrices en voie de développement, des organes sensitifs.

Nous fûmes bientôt convaincus que les fuseaux neuro-musculaires étaient des organes de sensibilité analogues aux terminaisons tendineuses, et sans doute en relation avec le sens musculaire.

Il était extrêmement difficile d'avoir ces fuseaux entiers dans la préparation, avec une longueur appréciable des nerfs afférents. On sait en effet que les préparations au chlorure d'or, méthode que nous avions choisie et

dont nous avions bien le maniement, ne réussissent qu'en prenant de très petits fragments de muscle. Cependant nous fûmes assez heureux pour réussir quelques grandes préparations, et pour avoir dans l'une d'elles un nerf se divisant à un étranglement annulaire de Ranvier, l'une des branches allant à un fuseau neuro-musculaire, l'autre à une terminaison tendineuse. Dès lors le problème était résolu, les deux organes avaient la même fonction.

Nous avons aussi pu montrer que les fibres musculaires constituant des fuseaux portaient des plaques motrices. Ces fibres se contractent par conséquent avec le reste du muscle et les fuseaux sont certainement des organes du sens musculaire.

Recherches sur les muscles de l'embryon.

Journal de la Physiologie et de la Pathologie, 1899.

Mes recherches ont porté sur la grenouille, l'axolotl, le poulet. En faisant comparativement des examens histologiques et des recherches sur l'excitabilité du muscle, j'ai cherché à voir comment se développait chez l'embryon la contractilité de cet organe.

Au début, quand il n'y a pas encore de fibrilles, c'est au protoplasma seul qu'il faut attribuer les mouvements, ils sont lents, automatiques. Chaque fois que l'on fait une excitation, il se produit le même mouvement qui n'a aucune relation avec la grandeur de l'excitation ni avec l'endroit où elle a été produite : on n'a fait que déclancher le mouvement, pour ainsi dire.

Quand les fibrilles ont pris une part prépondérante, le muscle est excitable localement et répond par une petite secousse brève à chaque excitation; l'amplitude de la secousse croît alors avec la grandeur de l'excitation.

Quand on prend un état intermédiaire, on voit se produire une superposition des deux effets, le muscle donnant une série de petites secousses en escalier.

Sur la structure du cylindre-axe des nerfs à myéline
Société de Biologie, 31 mars 1900.

Le cylindre-axe pendant la dégénération des nerfs sectionnés
Société de Biologie, 16 juin 1900.

Sur la régénération des nerfs écrasés en un point.
Société de Biologie, 16 juin 1900.

A propos de la note de M. S. R. Cajal :
« Méthode nouvelle pour la coloration des neuro-fibrilles ».
Société de Biologie, 26 déc. 1903.

Deux mémoires (déjà cités) dans le *Journal de la Physiologie et de la Pathologie*, 1903.

Au cours d'expériences sur les modifications de l'excitabilité qui accompagnent la dégénérescence du cylindre-axe après compression du nerf et sa régénération, je fus amené à reprendre l'histologie du cylindre-axe. Le premier, je montrai qu'il était composé d'un réseau à mailles, prenant, après fixation par l'acide osmique, le bleu de méthylène, bleu de toluidine, bleu de Unna, etc., et noyé dans une substance achromatique. Ce réseau est visible sur des coupes en travers, mais surtout sur des coupes en long fines et bien faites. J'ai étudié les divers stades d'excitabilité pendant la dégénération et de la régénération du nerf après l'écrasement, comme l'avait fait Erb, mais en les accompagnant d'études histologiques avec la méthode qui m'avait fait voir le réseau de cylindre-axe. Mes préparations ont été dessinées par M. Karmansky et figurent dans mon second mémoire du *Journal de la Physiologie et de la Pathologie*, 1903.

On y trouve aussi des figures représentant la dégénération de la plaque terminale. J'ai fait autrefois cette étude avec mon ami le Dr Dutil. A ce moment certains auteurs croyaient encore qu'après section le nerf séparé de son centre trophique dégénérait du centre à la périphérie. On ne possédait guère que deux ou trois expériences de Ranvier pour soutenir la marche inverse. Nous avons montré que c'est bien par la plaque que la dégénérescence commence, et que c'est au moment même où les derniers

vestiges de la plaque se détachent du nerf à la périphérie que l'excitation cesse de se transmettre au muscle. Chez le cobaye sur lequel ont porté presque toutes nos expériences, cette interruption de la conductibilité du nerf se produisait vers la 52[e] heure après la section.

Action de la vératime sur le muscle rouge et blanc du lapin.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 21 mai 1898.
Journal de la Physiologie et de la Pathologie, 1899.
(En collaboration avec M. Carvallo.)

J'ai donné les résultats de ce travail dans la première partie de l'exposé.

Résistance à la rupture des muscles en état de repos et de contraction. — *Société de Biologie*, 18 fév. 1899.

Ueber den Widerstand der Muskeln gegen die Zerreissung im Zustande der Ruhe und Erregung.
Archives de Pflüger, tome 75.
(En collaboration avec M. Carvallo).

De nombreuses expériences ont été faites sur la résistance du muscle à l'allongement, tant à l'état de repos que pendant sa contraction.

Au cours de recherches sur cette question, nous avons mis en évidence un fait extrêmement intéressant.

Quand on pratique l'allongement d'un muscle par traction, la résistance à la rupture est plus grande pendant la contraction que pendant le repos.

De plus l'excès de résistance pendant la contraction est précisément égale à la force de traction que le muscle est capable d'exercer.

Par exemple, prenons un gastrocnémien de grenouille dont la rupture au repos se fera sous une charge de 1 kilogramme. Mesurons sa force de traction au moment de sa tétanisation, elle sera de 600 grammes. La résistance à la rupture du muscle tétanisé sera de 1 kil. 600.

Voici les résultats que nous avons obtenus :

	MUSCLE INACTIF	MUSCLE ACTIF	DIFFÉRENCE	FORCE DE TRACTION
1	2500	3200	700	600
2	1550	2050	500	500
3	1600	2200	600	500
4	2200	2900	700	650
5	1550	2050	500	500
6	1600	2050	450	350
7	1200	1500	300	300
8	950	1250	300	300
9	1400	1800	400	400
10	1100	1450	350	350

Naturellement l'expérience sur le muscle inactif se faisait à droite par exemple, celle sur le muscle actif à gauche, sur le même animal, que l'on choisissait aussi symétrique que possible. Nous avions vérifié, en faisant sur les deux côtés des expériences identiques, que l'on obtenait les mêmes résultats, étant donnée l'approximation que nous cherchions. Il résulte de là que la force due à la contraction est un phénomène qui s'additionne à la résistance du muscle. Elle n'est pas due à une modification du muscle : c'est une propriété nouvelle qui se surajoute à ce qui existait déjà.

Influence de la section transverse des muscles sur l'excitation électrique. — *Comptes rendus de la Société de Biologie*, 8 janvier 1898.

Pour que l'excitation électrique se fasse dans les mêmes conditions sur des muscles de section différente, il faut que cette excitation mette en jeu des quantités d'électricité proportionnelles à la surface de section du muscle.

En opérant sur le gastrocnémien de grenouilles curarisées de dimensions très différentes, les résultats de l'expérience concordent d'une manière extrêmement satisfaisante avec les résultats calculés en admettant la loi de proportion comme rigoureusement exacte.

Influence de l'intensité et de la fréquence des excitations sur la production du tétanos physiologique.

Journal de la Physiologie et de la Pathologie, 1899.

(En collaboration avec M. Carvallo).

Pour étudier les relations qui existent entre la fréquence des excitations, leur intensité et la production du tétanos, les appareils habituellement en usage sont insuffisants. Leur disposition ne permet pas, en effet, de faire

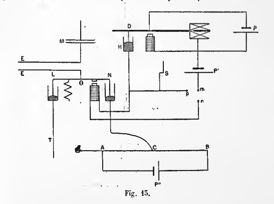


Fig. 13.

varier isolément la fréquence et l'intensité des excitations, ce qui est indispensable.

Grâce à l'appareil que nous avons installé, on pouvait non seulement effectuer isolément ces variations, mais connaître à chaque instant, en cours d'expérience, quelle était leur valeur.

Cet appareil est représenté schématiquement sur la figure 13.

Une lame vibrante D, dont on fait varier le nombre de vibrations en la raccourcissant ou déplaçant un poids qu'elle porte, est entretenue électriquement par une pile P. Dans ses oscillations, elle ferme périodiquement en H le courant de la pile P'. Si l'on met le cavalier *mn*, un électro-aimant

qui se trouve dans le circuit de P′ fait vibrer à l'unisson du diapason une petite clef de décharge très légère LN oscillant en O. Cette clef sert à charger et décharger le condensateur M à travers les électrodes EE. Le distributeur de potentiel A B alimenté par la pile P″ permet de faire varier le potentiel de charge du condensateur.

Pour faire une expérience, on règle le nombre de vibrations du diapason et on met le cavalier *mn* dans la position *mp*. Le signal de Desprez S enregistre alors sur un cylindre le nombre des vibrations par seconde du diapason. On revient alors à la position *mn* et l'on cherche le voltage qui donne le tétanos.

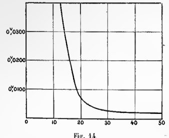


Fig. 14.

Nous avons ainsi pu faire une étude du tétanos physiologique, et montrer que, bien entendu, il y a une limite inférieure de la fréquence au-dessous de laquelle le tétanos ne peut se produire ; cette limite correspond à environ quatorze excitations par seconde, sur la grenouille à la température du laboratoire. A partir de là, à mesure que la fréquence augmente, il suffit que chaque excitation soit d'une intensité d'autant moindre que la fréquence est plus grande.

Nous avons pu donner une courbe représentant la relation qui doit exister entre la fréquence et l'intensité pour que le tétanos physiologique se produise. Cette courbe est représentée sur la figure 14.

Chronophotographie des muscles pendant la contraction.

Comptes rendus de la Société de Biologie, 20 juin 1896.

J'ai voulu, à l'aide de la chronophotographie microscopique, surprendre l'onde de contraction qui, suivant certains auteurs, accompagne la secousse de la fibre musculaire.

Cette question présentait de nombreuses difficultés. Il fallait un appareil très rapide ; par suite même de cette rapidité et des grossissements du microscope une très grande intensité lumineuse était nécessaire; enfin d'excellentes préparations bien vivantes et transparentes sont indispensables.

Après divers essais j'opérai définitivement sur l'hyoglosse de la grenouille et j'obtins quelques très bonnes épreuves en série. Sur ces épreuves jamais on ne vit se propager d'ondes.

Ceci concorde avec les observations des auteurs comme Laulanié, qui pensent que les ondes sont des phénomènes artificiels ne se rencontrant que sur le muscle altéré.

Influence du poids tenseur sur la contraction isométrique.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 29 janv. 1898.

Cette étude avait pour but de rechercher si dans la détermination de la force de traction d'un muscle il fallait se préoccuper de la tension initiale. Cette tension initiale influe sur le résultat obtenu. Pour avoir toujours des résultats comparables il ne faut pas laisser le poids tenseur agir librement sur le muscle, mais le soutenir.

La densité des muscles dans la série des vertébrés.
Journal de la Physiologie et de la Pathologie, 1899.

Sur les erreurs commises dans l'évaluation de la section transversale des muscles.
Journal de la Physiologie et de la Pathologie, 1899.
(En collaboration avec M. Carvallo.)

La première de ces notes contient une série de déterminations numériques de densités de muscles.

Dans la seconde nous montrons combien souvent on se trompe dans les expériences sur la résistance et l'élasticité du muscle, où il est nécessaire de connaître la section de ce muscle, et nous donnons la méthode qu'il est bon d'employer pour avoir des résultats comparables.

TITRE V

RELATION ENTRE LA FONCTION D'UN ORGANE ET SA FORME

Architecture des muscles. — *Société de Biologie*, 1er mai 1897.

Sur l'adaptation fonctionnelle des muscles.
Archives de Physiologie norm. et path., 1897.

Sur une exception apparente de l'adaptation fonctionnelle des muscles. — *Société de Biologie*, 16 mars 1901.

Le muscle dans la série animale (deux articles).
Revue générale des Sciences pures et appliquées, 1901.

Les travaux de Borelli, Marey, W. Roux, etc. consistèrent essentiellement à comparer la longueur des fibres de divers muscles au déplacement que ces muscles doivent produire. Tel muscle est court parce qu'il n'a besoin de se raccourcir que fort peu lors de sa contraction, tel autre est long parce qu'il doit produire un grand mouvement. Mais il était impossible de rechercher de cette façon si les divers muscles sont réellement parfaitement adaptés à leur fonction. Tel muscle ne se raccourcit que de 25 pour 100 de sa longueur au moment de sa contraction, tel autre le fait de 50 et 60 pour 100 ; il est impossible de les comparer entre eux pour savoir si réellement ils ont la longueur optima.

Je recherchai s'il était possible de trancher la question en s'adressant à des muscles à fibres non parallèles entre elles.

Partant de ce principe que deux fibres de même nature développent le même effort quand leur longueur est proportionnelle au déplacement de leur extrémité parallèlement à la direction de la fibre, on peut facilement établir la longueur rationnelle des fibres d'un muscle quand on donne leur direction.

Considérons par exemple un muscle triangulaire, c'est-à-dire un muscle

dont toutes les fibres vont en divergeant d'un point C vers une ligne d'insertion AB. Quand le point C se déplacera sur la perpendiculaire à AB, la fibre DC variera de longueur plus qu'une fibre oblique CB : donc elle doit aussi avoir une longueur plus grande. Un raisonnement simple de géométrie montre qu'en décrivant sur DC comme diamètre un cercle, pour chaque direction la portion de droite intérieure au cercle représente la meilleure longueur de fibre correspondant à cette direction.

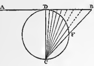
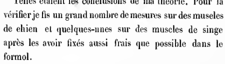


Fig. 15.

Il se peut que, sur un muscle, les fibres de direction différente ne partent pas toutes d'un point unique C, mais ce détail n'a aucune influence sur la longueur qu'elles doivent avoir, on peut pour faire la construction supposer qu'on les transporte parallèlement à elles-mêmes, de façon que l'une de leurs extrémités soit toujours en un même point.

Telles étaient les conclusions de ma théorie. Pour la vérifier je fis un grand nombre de mesures sur des muscles de chien et quelques-unes sur des muscles de singe après les avoir fixés aussi frais que possible dans le formol.



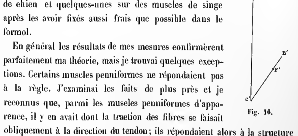


Fig. 16.

En général les résultats de mes mesures confirmèrent parfaitement ma théorie, mais je trouvai quelques exceptions. Certains muscles penniformes ne répondaient pas à la règle. J'examinai les faits de plus près et je reconnus que, parmi les muscles penniformes d'apparence, il y en avait dont la traction des fibres se faisait obliquement à la direction du tendon; ils répondaient alors à la structure que je prévoyais. Pour d'autres, les fibres que je croyais obliques se réfléchissaient simplement sur le ventre du muscle et exerçaient en somme une traction parallèlement à la direction du tendon; ils faisaient alors exception, n'avaient pas les mêmes fonctions mécaniques que les premiers, et c'est pourquoi je les ai qualifiés de pseudo-penniformes.

Finalement, je vis que, contrairement à l'opinion de Haughton, tous les

muscles sont construits rationnellement et sont parfaitement adaptés à leur fonction ; il n'y a pas, comme le pense ce savant, de mauvais rendement par suite d'une longueur défectueuse des fibres.

Sur l'adaptation fonctionnelle des organes de la digestion.

Société de Biologie, 1901.

Je me suis efforcé par divers procédés de faire varier la forme d'un organe en modifiant sa fonction. En particulier j'ai pu produire certains changements dans le tube digestif des canards en les alimentant soit à la viande, soit au maïs et au blé.

TITRE VI

LE TRAVAIL MUSCULAIRE

Le travail musculaire est la question dont je m'occupe depuis plusieurs années et qui fait actuellement l'objet de mes recherches. Avant de commencer mes expériences, j'ai fait une étude bibliographique complète de ce sujet difficile.

Les relations qui doivent exister entre le travail musculaire et les combustions de l'organisme ont été l'objet de nombreux travaux. Pendant longtemps, cependant, la question étant mal abordée, les efforts tentés n'étaient couronnés d'aucun succès.

C'est à M. Chauveau que nous devons d'avoir attaqué le problème par de bonnes méthodes, d'avoir apporté les résultats les plus importants et montré la route à suivre. Malheureusement les recherches de M. Chauveau furent publiées par lui sous une forme inabordable pour le plus grand nombre des lecteurs. Dans un premier mémoire je montrai comment ses résultats devaient être interprétés, conformément aux principes de la mécanique rationnelle ; les suivants renferment des recherches personnelles.

Je publiai à ce sujet :

Le travail musculaire d'après les recherches de M. Chauveau.
Revue des Sciences pures et appliquées, 15 février 1905.

Sur un moteur permettant d'étudier l'influence des divers facteurs qui font varier le rendement.
Société de Biologie, 21 mars 1901.

Sur le degré d'approximation de la formule de M. Chauveau.
Société de Biologie, 21 mars 1905.

Sur la formule de M. Chauveau.

Société de Biologie, 28 mars 1905.

La formule fondamentale de M. Chauveau exprime que, lors de l'exécution d'un travail, du soulèvement d'un poids pour préciser, la dépense totale est égale à la somme de dépenses que nécessiterait le simple soutien du poids; plus la dépense que nécessiterait le mouvement exécuté avec la même vitesse, mais sans le poids; plus enfin une dépense équivalente au travail extérieur produit.

M. Chauveau avait établi cette formule expérimentalement sur l'homme, puis il avait vérifié qu'elle s'applique aussi à un moteur électrique sur lequel il expérimenta.

Quelle était la valeur de la formule de M. Chauveau? Était-elle générale et pouvait-on l'établir théoriquement?

J'ai montré que l'on pouvait toujours représenter la dépense d'un moteur comme le faisait M. Chauveau, à la condition d'y ajouter un terme complémentaire. La formule est alors rigoureusement exacte.

Dans chaque cas particulier, se posera la question de savoir si le terme complémentaire est négligeable ou non.

Les expériences de M. Chauveau montrent qu'on peut ne pas en tenir compte dans le cas du travail musculaire, tout au moins dans les limites où ce savant a opéré.

Pour étudier la question plus à fond, j'ai imaginé un moteur dont je pouvais faire varier les conditions de travail dans de grandes limites.

Ce moteur consistait essentiellement en un cylindre vertical, de section connue, dans lequel on refoulait de l'eau sous pression constante par un orifice inférieur. Le plan d'eau montait dans ce cylindre; au lieu de lui faire soulever un piston, ce qui eût introduit des frottements inconnus, une tranche de liquide représentait le poids soulevé. A la partie inférieure du même cylindre se trouvait un orifice de perte systématique dont on modifiait la valeur à volonté.

Sur la partie supérieure du liquide reposait un flotteur dont le déplacement s'enregistrait sur un cylindre tournant.

On peut à volonté étudier les conditions du travail sur la courbe relevée sur le cylindre enregistreur, ou bien les déterminer par le calcul, connaissant la valeur des orifices d'arrivée et de perte percés en mince paroi, la hauteur du plan d'eau et la pression.

J'ai pu avec ce dispositif reproduire tous les cas étudiés par M. Chauveau sur le muscle, c'est-à-dire étudier l'influence du poids soulevé, l'influence de la vitesse avec laquelle le travail est produit, et même l'influence de la hauteur à laquelle se trouve le poids au moment de la production du travail.

Voici les faits que j'ai pu établir :

1. Dans le cas du simple soutien d'un poids, la dépense croît plus rapidement que la grandeur du poids ;

2. Pour donner au moteur sa vitesse à vide, il faut une dépense croissant plus rapidement que cette vitesse ;

3. Dans le cas de soulèvement d'un poids, aux faibles vitesses, la dépense croît très rapidement avec le poids soulevé; il n'en est pas de même aux grandes vitesses.

Exemple :

Vitesse.	Dépense		Rapport.
	pour 1 K.	pour 10 K.	
—	—	—	—
0,001	2,4	55,1	23
0,01	18,9	159,6	8
0,1	5400	6800	1,3

Dans le tableau suivant je donnerai le résultat de l'application de la formule de M. Chauveau à mon moteur, Q représentant la dépense réelle totale, et Σ cette dépense évaluée en faisant la somme de la dépense de soutien, de la dépense de production de vitesse à vide, et de la dépense réellement utilisée en travail. J'ai fait cette vérification pour diverses vitesses et divers poids soulevés. De plus j'ai fait varier la hauteur h du plan d'eau au moment du démarrage, ce qui nécessite une dépense spéciale, de même qu'il y a une dépense spéciale dans le muscle suivant qu'il est plus ou moins raccourci, toutes choses égales d'ailleurs.

VALEURS DE h	DÉPENSE POUR 1 KILO		DÉPENSE POUR 10 KILOS	
	Q	Σ	Q	Σ
Pour $V = 0,001$				
$h = 0,1$	6,09	6,05	63,01	62,66
$h = 0,2$	10,48	10,45	71,24	70,89
$h = 0,4$	20,91	20,97	88,60	88,27
$h = 1,0$	63,01	62,96	147,22	146,89
$V = 0,001$				
$h = 0,1$	32,72	31,54	177,10	169,15
$h = 0,2$	47,05	46,08	194,92	187,53
$h = 0,4$	77,19	76,39	231,41	224,68
$h = 1,0$	177,10	176,47	347,20	341,39
$V = 0,1$				
$h = 0,1$	56,11	55,19	69,92	64,67
$h = 0,2$	57,85	57,14	71,34	66,66
$h = 0,4$	61,08	60,54	74,15	70,12
$h = 1,0$	69,92	69,58	82,41	79,32

Ce tableau résume toutes les questions que l'on peut se poser au sujet de la dépense du moteur que j'ai envisagé. Il montre entre autres que la formule de Chauveau est d'autant plus exacte que la vitesse et le poids soulevé sont moindres, et que la dépense de démarrage ou de hauteur est plus grande.

J'ai ensuite montré sur le même moteur qu'en soulevant et abaissant attentivement un poids autour d'une position d'équilibre, la dépense est plus grande qu'en le soutenant au point moyen. Cette différence croît dans le cas de mon moteur avec le carré de la vitesse et la racine carrée du poids. On retrouve quelque chose d'analogue à ce que M. Chauveau a vu sur le muscle.

Quand on soulève un même poids avec des vitesses croissantes, la dépense pour produire un kilogrammètre va d'abord en diminuant, puis elle passe par un minimum, pour augmenter ensuite.

(Sans dépense de démarrage ; les mêmes résultats généraux s'observent avec une dépense de démarrage.)

Dépense par kilogrammètre pour 1 kilogramme :

Vitesse.	Dépense par Kgm.
0,001	2,47
0,002	1,80
0,005	**1,55**
0,01	1,89
0,02	3,56
0,04	10,08
0,1	54,16

Le minimum se produit par une vitesse d'autant plus grande que le poids soulevé est plus important.

Poids soulevé.	Vitesse donnant le minimum.
1 Kilogr.	0,005
5 —	0,010
10 —	0,015

Si la vitesse restant constante, l'on fait croître le poids soulevé, la dépense passe encore par un minimum se produisant d'autant plus tardivement que la vitesse est plus grande. Il en résulte que pour les très faibles vitesses le rendement semble diminuer d'une façon continue avec l'augmentation du poids, et que pour les très grandes vitesses il semble augmenter indéfiniment.

Dépense par kilogrammètre produit :

Poids soulevé.	V = 0,001	V = 0,01	V = 0,1
1	2,47	1,89	54,16
2	3,04	1,65	28,05
3	3,49	1,57	19,28
4	3,87	1,55	17,57
5	4,18	**1,54**	12,21
6	4,50	1,55	10,45
7	4,78	1,56	9,16
8	5,04	1,57	8,20
9	5,28	1,58	7,45
10	5,51	1,59	6,85

Enfin en faisant varier simultanément la vitesse et le poids pour conserver le même travail dans l'unité de temps, on retrouve un minimum de dépense par kilogrammètre correspondant à un certain poids et une certaine vitesse.

Poids.	Vitesse.	Dépense par kilogrammètre.
1	0,1	64,16
2	0,05	8,19
3	0,0333	3,40
4	0,0250	2,21
5	0,0200	1,79
6	0,0166	1,62
8	0,0125	**1,54**
10	0,0100	1,60
12	0,0083	1,70
14	0,0071	1,83
16	0,0062	1,98
18	0,0055	2,15
20	0,0050	2,33

Sur les origines de la force musculaire.
Société de Biologie, 12 déc. 1903.

Une discussion importante s'est élevée en Allemagne entre Engelmann et Fick sur la nature du moteur animal. Fick soutenait avec beaucoup d'autres physiologistes de tous pays que ce ne pouvait être un moteur thermique, Engelmann cherchait à réfuter les arguments de Fick. La controverse finit par se localiser sur des preuves tirées de l'application du théorème de Carnot. Divers savants avaient déjà invoqué ce théorème pour rejeter l'hypothèse du moteur thermique.

J'ai montré que la discussion qui s'est élevée entre Engelmann et Fick au sujet de cette application du théorème de Carnot reposait sur une erreur.

Le maximum de rendement d'un moteur ne peut être évalué par la formule de Carnot que dans le cas où le cycle des opérations est fermé.

Cela n'a pas lieu dans les conditions où Engelmann et Fick posaient le problème. J'ai montré comment il faudrait s'y prendre pour fermer le cycle.

Je ferai remarquer que je n'ai jamais soutenu, comme on me l'a fait dire, que le moteur animal était un transformateur de chaleur en travail, j'ai simplement montré que l'argument de Fick n'était pas valable et que sa controverse avec Engelmann reposait, de la part des deux auteurs du reste, sur une mauvaise application du principe de Carnot.

TITRE VII

OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE

Pouvoir séparateur de l'œil. — *Société de Physique*, 3 mai 1899 et une brochure, Paris 1889.

Étude expérimentale des diverses causes qui limitent le pouvoir séparateur de l'œil et comparaison des diverses radiations lumineuses à cet égard.

L'ombre pupillaire.
Revue générale des Sciences pures et appliquées, 1891, *Société de Physique*, 5 juin 1891.

La démonstration que j'ai donnée en 1891 du phénomène de l'ombre pupillaire est celle qui est adoptée aujourd'hui dans tous les ouvrages qui ont traité cette question.

Pour appuyer ma démonstration théorique sur des preuves expérimentales, j'ai fait deux sortes d'expérienees.

En premier lieu, au lieu de me servir d'un opbtalmoscope percé d'un trou, que l'on fait osciller pour voir apparaître l'ombre pupillaire, j'ai monté dans un support un miroir dont j'avais gratté l'argenture sur une petite bande horizontale. Dès lors, observant l'œil d'un sujet, et déplaçant le mien le long de la fente du miroir, j'ai pu vérifier que le faisceau lumineux sortant de l'œil observé a bien la constitution que lui assignait ma théorie. Je pouvais ensuite par gradation déplacer angulairement le miroir et faire de nouvelles observations, en un mot, suivre dans une expérience ce que la théorie sur le papier me faisait prévoir.

En second lieu, j'ai fait un grand œil artificiel représentant l'œil observé auquel je pouvais à volonté conférer l'emmétropie, la myopie et l'hypermétropie. L'œil observateur était représenté par un système optique, le tableau de projection figurant la rétine de cet observateur. Enfin, un

grand miroir percé d'un trou représentait l'ophtalmoscope. Je pouvais ainsi montrer à tout un auditoire les divers cas de la skiascopie. C'est ce que j'ai fait devant la Société de Physique et ce que j'ai répété souvent à mes leçons.

Puissance des systèmes centrés.

Congrès de l'Association française pour l'avancement des Sciences à Caen, 1894 et *Revue des Sciences pures et appliquées*, 1894.

D'après la définition habituelle de la puissance d'un système optique, cette puissance est mesurée par l'inverse de sa distance focale.

Il en résulte certains inconvénients. Dans les systèmes à distances focales antérieure et postérieure inégales, comme les dioptres, l'œil, il y a deux puissances. En second lieu, le grand avantage offert par le numérotage des verres en puissance est que, lors de la superposition des verres, les puissances s'ajoutent algébriquement, mais cette règle simple ne subsiste plus quand on superpose une lentille à un dioptre, par exemple.

Si, au contraire, on admet comme définition générale de la puissance l'inverse de la distance focale, multiplié par l'indice de réfraction du dernier milieu $P = \frac{n}{F}$, ces diverses difficultés disparaissent. Un système optique quelconque a une seule puissance, et l'on peut appliquer la règle d'addition.

Remarquons que, dans le cas des lentilles, l'indice du dernier milieu étant 1, on retombe sur la définition habituelle de la puissance : il n'y a donc rien à changer à ce qui existe, ma proposition ne fait que généraliser et étendre à d'autres systèmes optiques des notions qui n'avaient de valeur que dans un cas limité.

Nous allons voir immédiatement l'avantage qui en résulte ; j'ajouterai s.ulement que, dans le premier mémoire que j'ai publié à ce sujet, j'ai aussi indiqué comment, à l'aide d'un abaque, on résout facilement les problèmes relatifs aux additions de puissanees et aux conversions de puissances en distances focales.

Amplitude d'accommodation. — *Annales d'oculistique*, 1895.

Quand l'œil, que nous supposerons emmétrope, pour simplifier, regarde un objet rapproché, il accommode, c'est-à-dire qu'il augmente de puissance. On peut pratiquement remplacer cette accommodation par un artifice, consistant à ajouter devant l'œil une lentille convergente. On a l'habitude de désigner la valeur de l'accommodation par la puissance de la lentille convergente produisant le même effet, au point de vue de la vision nette des objets.

Mais l'effet de cette lentille varie avec la position qu'on lui assigne devant l'œil, et par suite, pour produire un même effet, on devra employer une lentille de puissance différente suivant l'endroit où on la suppose placée.

Or, avec les diverses positions que l'on a proposé d'adopter, et en admettant l'ancienne définition de la puissance des systèmes optiques, on était amené à un résultat singulier : la lentille, pouvant remplacer l'accommodation et servant à l'évaluer en dioptries, n'avait pas une puissance égale à l'augmentation de puissance de l'œil. Cela est évidemment irrationnel, et dire que l'œil fait une accommodation de 10 dioptries devrait signifier que sa puissance augmente de 10 dioptries.

Ce n'est qu'avec la définition de la puissance que j'ai donnée, et avec les règles que j'ai proposées, que cette condition est satisfaite. Ainsi, si un œil emmétrope veut regarder à $0^m,10$ en avant de son plan principal, il faut que la puissance de l'œil, *évaluée avec ma définition*, croisse de 10 dioptries ; et une lentille idéale placée au plan principal, ayant 10 dioptries, produirait le même effet ; elle donnerait la vision nette en augmentant de 10 dioptries la puissance du système optique.

Avec toutes les autres méthodes ce résultat simple et rationnel n'est pas obtenu. Ainsi, pour citer un exemple frappant, si l'on évalue l'accommodation par le procédé le plus répandu, c'est-à-dire en lui attribuant comme valeur la puissance de la lentille, qui, placée au foyer antérieur de l'œil, donne la vision nette, la puissance de cette lentille n'est nullement égale

à l'augmentation de puissance de l'œil lors de l'accommodation, et de plus l'œil muni de son verre forme un système de même puissance que l'œil

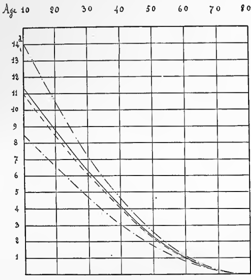


Fig. 17. — Cette figure représente les variations de l'amplitude d'accommodation avec l'âge, d'après les différentes conventions qui ont été faites.

— ·· — ·· — Courbe de Donders. — La lentille équivalente est placée au foyer antérieur de l'œil. — La puissance de cette lentille mesure l'accommodation.

— — — — — La lentille équivalente est supposée placée au centre optique.

— · — · — Courbe d'accroissement de puissance de l'œil réduit avec l'ancienne définition de la puissance.

———— Courbe représentant à la fois la puissance de la lentille mesurant l'accommodation et placée au plan principal, et l'accroissement de la puissance de l'œil réduit avec ma définition.

seul. L'effet du verre a été de porter en avant le plan principal et le foyer, sans changer la distance focale.

Les mêmes raisonnements s'appliquent à la correction de la myopie et de l'hypermétropie. Ce n'est qu'avec mon procédé que le verre correcteur

représente ce que l'œil a en excès ou ce qui lui manque, et ramène la puissance de l'œil à sa valeur normale d'œil emmétrope.

Mesure de la puissance des systèmes centrés.

Société de Physique, 1er fév. 1895.

Si l'on place au foyer d'un système optique un objet de grandeur C, l'image de cet objet sera à l'infini et son diamètre apparent sera $\frac{C}{f}$.

Si l'on regarde cette image avec une lunette réglée sur l'infini, la grandeur de l'image se formant au plan focal de l'objectif de la lunette sera proportionnelle à $\frac{C}{f}$, c'est-à-dire, si C est constant, proportionnelle à la puissance du système optique étudié.

J'ai installé un appareil basé sur ce principe et permettant par une simple lecture de connaître immédiatement la puissance d'un système optique. Une lunette est réglée sur l'infini; on place devant son objectif le système optique dont on veut mesurer la puissance; au delà de ce système optique se trouve un objet linéaire, perpendiculaire à l'axe de visée, que l'on rapproche ou éloigne jusqu'au moment où l'image vue à travers la lunette est nette. A ce moment l'objet est au foyer du système étudié; on lit la grandeur de l'image sur une échelle divisée se trouvant dans le plan focal de l'objectif de la lunette, que l'on observe à travers l'oculaire. Le chiffre lu donne la puissance, si l'appareil a été étalonné au préalable.

Si la dimension de l'objet d'épreuve est une division décimale du mètre, ainsi que la distance focale de l'objectif de la lunette, et si l'échelle est graduée en fractions décimales du mètre, la lecture se fait immédiatement en dioptries; il suffit de bien placer la virgule dans le nombre lu.

Cette méthode est très précise et très rapide, elle s'applique en particulier avec avantage aux systèmes à petite distance focale, par suite très puissants, comme les objectifs microscopiques. J'ai fait construire dans ce but un petit modèle de mon appareil, pouvant se mettre à la place d'un oculaire de microscope, et permettant ainsi de déterminer rapidement la

puissance d'un de ces oculaires. Dans ce modèle, au lieu de lire la puissance sur une division, on amène un réticule, successivement aux deux extrémités de l'image, à l'aide d'une vis micrométrique, et on lit la puissance sur un petit tambour gradué.

Mesure des indices de réfraction. — *Journal de Physique*, 1897.

Ma méthode de mesure des puissances peut servir à la détermination rapide des indices de réfraction des liquides. Pour cela j'ai fait construire une petite cuve formée par deux lentilles plan convexes, dont la convexité est tournée vers l'intérieur de la petite cuve, les côtés plans formant l'extérieur et étant parallèles entre eux. Si l'on place une goutte du liquide à étudier entre les deux lentilles et que l'on mesure la puissance du système, il est aisé de voir que cette puissance est donnée par

$$p = (n' - n)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)$$

n étant l'indice cherché, n' celui des lentilles, R, R' les rayons de courbure des faces internes de ces lentilles.

On tire de là

$$n' - n = Ap.$$

C'est-à-dire que connaissant A, on a par une simple lecture l'excès de l'indice des lentilles sur celui du liquide, si on connaît l'un d'entre eux on a l'autre. A se détermine une fois pour toutes en faisant une mesure sur l'eau distillée dont on connaît l'indice. Ce procédé est très propre aux mesures d'indices des liquides dont on ne peut avoir qu'une faible quantité, par exemple des liquides de l'œil : une petite goutte suffit.

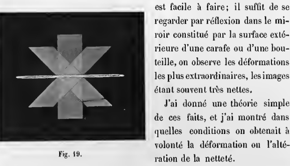
Si l'on voulait faire des déterminations sur des liquides à indice supérieur à celui du verre, ce qui est rare, il faudrait faire faire une petite cuve spéciale avec des lentilles plan concaves.

Les images dans les systèmes astigmates.
Annales d'oculistique, 1895.

L'astigmatisme altère la netteté et la forme des images formées par les systèmes optiques. Mais ce manque de netteté et cette déformation ne sont pas solidaires, ces deux effets peuvent se montrer isolément. Quand un astigmate regarde un objet, ce qui le frappe particulièrement, c'est le manque de netteté de certaines lignes; chacun peut se rendre compte de cette impression en regardant un objet à travers une lentille cylindrique placée devant l'œil.


Fig. 18.

Si, sans astigmatisme, on regarde l'image d'un objet se formant, par exemple, dans un miroir à courbures inégales, ce qui domine c'est la déformation de l'image. L'expérience est facile à faire; il suffit de se regarder par réflexion dans le miroir constitué par la surface extérieure d'une carafe ou d'une bouteille, on observe les déformations les plus extraordinaires, les images étant souvent très nettes.


Fig. 19.

J'ai donné une théorie simple de ces faits, et j'ai montré dans quelles conditions on obtenait à volonté la déformation ou l'altération de la netteté.

Pour appuyer ma démonstration théorique sur des preuves expérimentales, j'ai pris un appareil photographique figurant l'œil, et j'ai réalisé

les divers cas qui peuvent se présenter. Les clichés que j'ai obtenus ainsi sont très démonstratifs et les figures correspondantes sont jointes à mon mémoire. Si l'on prend comme objet une étoile, figure 18, et qu'on en fasse l'image au moyen d'un système astigmate, par exemple à l'aide d'un objectif dans lequel on aura introduit une lentille cylindrique, l'image est à la fois déformée et floue, sauf suivant certaines directions de lignes, figure 19. Si maintenant on diaphragme de plus en plus l'objectif, le flou disparaîtra peu à peu. Sur la figure 20 on voit l'image de l'étoile sensiblement plus nette que sur la figure 19.



Fig. 20.

Bien entendu, ces effets seront d'autant plus accentués que le système est plus astigmate, c'est-à-dire que la différence de puissance entre deux méridiens perpendiculaires entre eux est plus grande.



Fig. 21.

Formons une image de l'étoile avec un système faiblement astigmate, par exemple en superposant à un objectif d'une dizaine de dioptries une lentille cylindrique d'une demi-dioptrie. L'image ne semblera pas très déformée, ce qui domine étant le manque de netteté. Si nous forçons l'astigmatisme avec des lentilles cylindriques de plus en plus fortes, nous aurons des images avec un manque de netteté croissant.

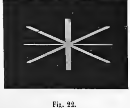


Fig. 22.

Si, au lieu de recevoir l'image sur un écran, on laisse se former l'image

aérienne, et que l'on photographie cette image, en plaçant sur le prolongement du faisceau lumineux un appareil photographique on a un cliché donnant une image sensiblement nette, mais déformé.

J'ai donné de ce phénomène une démonstration expérimentale très frappante.

Reprenons l'étoile huit branches et formons une image réelle que nous recevrons sur un écran transparent. Cette image aura la forme de la figure 21. Plaçons derrière l'écran un appareil photographique et mettons au point sur l'écran, l'image obtenue sur l'épreuve sera semblable à la figure 21 évidemment, car l'image sur l'écran se comporte comme un objet. Pour que l'expérience soit frappante, je me suis servi d'un système à fort astigmatisme. Retirons maintenant l'écran transparent, sans rien changer au point de l'appareil photographique, et faisons une nouvelle épreuve ; nous aurons la figure 22, nette avec déformation, parce que nous photographions une image aérienne.

En résumé, quand avec un système astigmate on fait l'image réelle d'un objet sur un écran, cette image manque de netteté suivant certaines directions et a subi une déformation. C'est le manque de netteté qui frappe surtout l'observateur, mais on peut le diminuer en diaphragmant de plus en plus le système optique.

C'est ainsi que, lorsque l'œil astigmate regarde un objet, ce qui frappe surtout l'observateur, c'est le flou de certaines lignes, qui l'emporte de beaucoup sur la déformation. L'œil n'est pas très diaphragmé, car la pupille est petite, il est vrai, mais la distance focale de l'œil l'est aussi, or ce n'est pas la valeur absolue du diamètre du diaphragme qu'il faut considérer, mais son rapport à la distance focale.

Quand il se forme une image dans un système astigmate, cette image est déformée et floue. Mais si, à l'aide d'un second système optique non astigmate, ne présentant pas une ouverture tout à fait exceptionnelle, on fait une image de l'image aérienne primitive, cette seconde image ne présente guère que de la déformation. C'est par exemple le cas qui se présente quand l'œil regarde un objet par réflexion dans un miroir à courbures négales.

C'est pour ces raisons qu'un sujet astigmate est surtout frappé par le manque de netteté des images qui se forment sur sa rétine, tandis que si l'on regarde les images se formant par réflexion sur sa cornée elles paraissent nettes mais déformées.

Sur l'aberration de sphéricité de l'œil.

Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 16 janvier 1902.

J'ai dit dans la première partie de l'exposé en quoi consistait mon observation et quelle était l'explication que j'en avais donnée.

TITRE VIII

APPAREILS

Appareil enregistreur des variations de poids d'un corps.

Arch. de Physiologie norm. et path., 1897.

Rédier avait construit un modèle de balance enregistrante, dans lequel les variations de poids du corps placé sur la plate-forme d'une balance de Quintenz étaient sans cesse compensées, grâce à un train différentiel, par l'immersion ou l'émersion d'un flotteur cylindrique dans un vase contenant de l'eau, et placé sur le plateau destiné aux poids.

On enregistrait les variations de plongée du flotteur.

Dans ce dispositif l'enregistreur était solidaire de la balance, et l'on ne disposait pas à volonté de la sensibilité de la méthode.

Je modifiai le système de Rédier en profitant de la facilité que nous donne aujourd'hui le moteur électrique pour enrouler ou dérouler un fil sur un treuil par la simple fermeture d'un circuit. J'établis ainsi un dispositif simple pouvant s'adapter à une balance quelconque et pouvant par suite servir à enregistrer de très faibles ou de très grandes variations de poids avec une même sensibilité.

Il suffit de fixer à chaque plateau de la balance un petit fil de platine terminé en pointe et pouvant venir affleurer une surface de mercure soit dans le godet H, soit dans le godet K, comme le montre la fig. 23.

Ces godets sont reliés aux extrémités d'une pile de deux éléments en série. Du milieu de la pile part un fil allant à un moteur électro-magnétique M agissant sur un treuil. Ce treuil enroule ou déroule le fil portant le flotteur cylindrique P, dont on enregistre les déplacements sur le cylindre E. Le flotteur plonge dans un vase B contenant de l'eau et placé sur un des plateaux de la balance, l'autre supportant le corps dont on étudie les variations de poids. Il est aisé de voir que lorsque le fléau s'incline dans un sens ou l'autre, le corps augmentant ou diminuant de poids, le

contact se fait en H ou en K, le moteur M tourne dans un sens ou dans l'autre et le plongeur descend ou monte pour rétablir l'équilibre. Pour étalonner l'appareil, il suffit de faire l'équilibre à l'aide de corps à poids constant dans les deux plateaux, puis d'ajouter sur l'un d'eux une surcharge connue. L'équilibre se rétablit automatiquement et sur le tracé on trouve l'indication du poids.

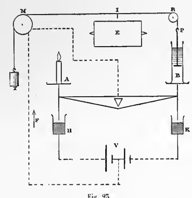


Fig. 25.

Le plongeur P est choisi convenablement, suivant la sensibilité que l'on désire obtenir, mais le reste de l'appareil ne nécessite aucune modification quand on passe d'une balance à une autre.

Lorsque le niveau du mercure est bien réglé en H et en K, le fléau reste presque immobile ; la moindre inclinaison suffit pour produire le contact à droite ou à gauche. Ceci permet d'appliquer la méthode à un cas particulier très intéressant.

On place sur le plateau A de la balance des tubes contenant soit des substances capables d'absorber l'acide carbonique, soit capables d'absorber la vapeur d'eau. On les relie par un tube de caoutchouc souple à une enceinte où se trouve un animal et l'on fait passer un courant d'air. L'acide carbonique ou la vapeur d'eau font varier le poids des tubes absorbants et l'on enregistre ce que l'animal a éliminé. Cette liaison par un caoutchouc souple d'un corps placé sur la balance à un corps fixe ne trouble pas les résultats, comme me l'a montré l'expérience, à cause de l'immobilité du fléau.

J'ai en particulier étudié ainsi comment se comportent les animaux dans une atmosphère contenant des quantités variables d'oxyde de carbone, et

j'ai montré que, l'empoisonnement allant en progressant, la quantité d'acide carbonique éliminé reste constante jusqu'au moment même de la mort.

Sur la comparaison des tracés obtenus à l'aide d'appareils enregistreurs différents. — *Société de Biologie*, 10 avril 1897.

Comparaison de huit sphygmographes de modèles différents. Je montre à quelle erreur on s'expose en voulant comparer entre eux des tracés pris avec des appareils non vérifiés. La plupart des sphygmographes du commerce sont sans valeur, ayant souvent du jeu dans leurs organes et presque toujours trop d'inertie. Il faut se méfier tout particulièrement du Dudgeon, qui est malheureusement le modèle le plus répandu à cause de la facilité avec laquelle on le manœuvre.

Appareil de démonstration pour l'étude des mouvements oscillatoires. — *Société de Biologie*, 28 déc. 1901.

Cet appareil se compose de deux pendules oscillants dont on peut transmettre les mouvements soit isolément, soit simultanément, à un même style enregistreur. On peut du reste faire varier la longueur et par suite la période d'oscillation de ces pendules, ainsi que leur amortissement. Cela permet de montrer sur des graphiques soit comment un mouvement oscillatoire s'amortit, soit comment deux mouvements oscillatoires ajoutent ou retranchent leurs effets. En somme, on peut réaliser simplement un grand nombre d'expériences dont il est généralement difficile de faire saisir les résultats aux personnes peu familières avec l'usage des mathématiques.

Recherches sur les appareils magnéto-faradiques employés en physiologie et en médecine.
Société de Biologie, 28 déc. 1901 et *Annales d'Électrobiologie*, tome V.

A l'aide d'un oscillographe de Blondel j'ai étudié un certain nombre d'appareils d'induction utilisés en médecine.

J'ai commencé par les bobines. Quand on place dans le primaire d'une

bobine un interrupteur à mercure bien disposé, le mercure étant au pôle négatif de la pile, couvert d'une couche d'eau alcoolisée, et le contact se faisant avec une pointe de platine, on peut avoir un tracé très régulier. La plupart des interrupteurs du commerce, du moins parmi ceux que j'ai étudiés, donnent au contraire les plus grandes irrégularités, ainsi que le montrent les tracés annexés à mon mémoire. Les médecins électriciens se préoccupent généralement beaucoup de la différence des effets obtenus avec les bobines à fil fin et les bobines à gros fil; j'ai recherché quelles étaient les conditions dans lesquelles les deux espèces de bobines produisaient le

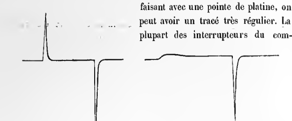


Fig. 24. — Chariot de Du Bois Reymond sans fer doux. L'interruption se fait dans le mercure.

Fig. 25. — Même chariot avec fer doux et interruption dans le mercure. On voit la grande différence qui se produit entre l'onde de fermeture et l'onde de rupture.

Fig. 26. — Même chariot avec fer doux et interrupteur sec du commerce. — Il se produit des irrégularités considérables.



Fig. 27 et 28. — Ondes induites produisant le même effet sensitif, 27 avec une bobine à gros fil et 28 avec une bobine à fil fin.

même effet au point de vue sensitif. J'ai trouvé, contrairement à mon attente que la bobine à fil fin permettait l'emploi d'un courant induit plus intense que la bobine à gros fil. Ceci est en contradiction avec l'idée que les praticiens se font généralement de ce phénomène.

J'ai passé ensuite à l'étude des appareils dynamo-électriques. Parmi ces appareils il y en a qui portent une soi-disant graduation, faite en lançant le courant dans le galvanomètre et évaluant la valeur de ce courant par

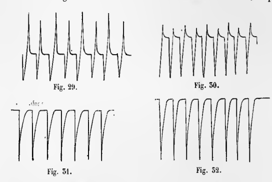


Fig. 29, 30, 31, 32. — Tracés pris sur une petite dynamo du type Clark destinée aux usages médicaux et portant un collecteur ayant pour but de graduer l'intensité du courant. Les quatre tracés correspondent à quatre positions successives du collecteur. On voit que l'on redresse peu à peu le courant au lieu de faire simplement varier son intensité.

la déviation obtenue. En modifiant la position d'un collecteur, on gradue l'intensité du courant. Or l'expérience m'a montré qu'on est conduit ainsi aux erreurs les plus graves. Dans la position du collecteur correspondant au minimum d'effet, le galvanomètre ne donne qu'une faible indication parce que le courant produit par l'appareil est alternatif. Cela ne veut pas dire qu'il n'exerce aucun action sur l'organisme, loin de là. A mesure que l'on tourne le collecteur, le courant se redresse, simplement, mais il n'y a aucune espèce de relation entre la quantité d'électricité débitée et la graduation faite à l'aide du galvanomètre. La graduation portée par ces appareils est donc entièrement illusoire.

Parmi les diverses dynamos que j'ai étudiées, la meilleure est une petite



Fig. 53. — Petite dynamo médicale à collecteur sur lequel le courant se prend à l'aide de frotteurs. On voit les irrégularités nombreuses dues à un contact imparfait des balais.



Fig. 54. — Petite dynamo médicale à bobines fixes et aimant mobile. Tracé pris sans résistance extérieure.



Fig. 55.
Même machine. Résistance extérieure consistant en une bobine avec self induction.



Fig. 56.
Même machine. Résistance extérieure liquide de 9000 ohms environ.

machine à bobines fixes et à aimant mobile construite par M. d'Arsonval. Elle ne comporte pas de balais frotteurs, lesquels sont une grande cause

d'irrégularité comme on le voit sur les tracés que j'ai pris. J'ai montré comment la courbe de courant fournie par la machine de d'Arsonval se



Fig. 37. — Même machine. La résistance extérieure est constituée par le corps humain.

modifie quand on intercale dans le circuit diverses résistances et en particulier le corps humain.

Sur l'enregistrement des rayons N par la photographie.
Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 12 déc. 1904.

J'avais suivi avec grand intérêt les expériences de M. Blondlot sur de nouveaux rayons émanés de diverses sources. Lorsque ces rayons parurent offrir un intérêt particulier pour la physiologie, en présence des résultats extraordinaires annoncés, je m'en préoccupai encore davantage. A ce moment, en France et surtout à l'étranger, le doute commença à pénétrer dans les esprits, et l'existence même des rayons N fut mise en cause.

La première des choses me parut devoir être de vérifier cette existence.

En collaboration avec M. Bull, je fis une série de recherches qui me conduisirent à considérer comme entachées d'erreur les expériences faites à ce sujet. Les seules, en effet, qui paraissaient devoir être retenues, jusqu'à nouvel ordre, étaient basées sur des enregistrements photographiques. Une plaque sensible recevant la faible lumière venant d'une petite étincelle électrique était plus fortement voilée quand un faisceau de rayons N tombait sur l'étincelle que lorsqu'elle y était soustraite. Un des défauts des expériences faites à cet égard consistait en ce que les épreuves comparatives étaient faites successivement et non simultanément.

Je fis construire une petite boîte en plomb, contenant deux compartiments séparés par une cloison en plomb. Dans chacun d'eux se trouvait un petit

micromètre à étincelles très délicat dont la lumière tombait sur une plaque photographique débordant dans les deux compartiments; on pouvait ainsi opérer comparativement et simultanément sur deux étincelles.

Je vérifiai d'abord, par de nombreuses expériences, qu'en l'absence de toute action, les deux étincelles donnaient le même voile. Puis je recommençai l'expérience en faisant tomber les rayons N supposés émanés d'une lampe Nernst, tantôt sur l'un, tantôt sur l'autre des deux micromètres.

Plusieurs douzaines de plaques furent ainsi traitées, et la conclusion fut qu'il n'y avait aucune espèce d'action du genre de celles qui avaient été signalées.

Dans la suite, mon appareil fut utilisé au laboratoire de M. Gouy, à Lyon. Pas plus que moi on ne put obtenir le moindre effet analogue à celui que l'on attribuait aux rayons N.

59166. — Imprimerie Lahure, 9, rue de Fleurus, à Paris.

TITRE IX

CHALEUR ANIMALE ET ÉCHANGES GAZEUX

Les Échanges respiratoires des nouveau-nés et l'Indice d'Oxygénation.

Bulletin de l'Académie de Médecine, 1er Décembre 1908.

Ce travail a été exécuté dans le service de M. le Professeur Pinard. Il avait pour but de déterminer la quantité d'acide carbonique rendu et d'oxygène absorbé par les nouveau-nés pendant les premiers jours qui suivent la naissance, et de rechercher s'il existe quelque relation entre la grandeur des échanges respiratoires et l'état des enfants.

Mon appareil consistait en une boîte en laiton de 60 litres de capacité, dans laquelle on plaçait le sujet en expérience, et que l'on pouvait clore hermétiquement. Une glace permettait de suivre ce qui se passait à l'intérieur de la chambre d'épreuve dont un thermomètre donnait la température.

L'enfant séjournait un certain temps dans cette enceinte, une heure par exemple; à la fin, on en brassait l'air à l'aide d'un petit ventilateur électrique, afin d'assurer l'homogénéité du gaz, puis on faisait une prise qui était analysée. J'ai fait ainsi 59 expériences portant sur 12 enfants.

Des analyses de gaz faites, je déduisais la quantité totale d'oxygène absorbé et d'acide carbonique éliminé pendant le séjour de l'enfant dans la chambre d'épreuve, puis je rapportais ces quantités à l'heure et au kilogramme d'enfant.

On constate que, rapportés au même poids, les échanges respiratoires sont notablement supérieurs chez le nourrisson à ce qu'ils sont chez l'adulte. Il résulte, en effet, des nombreuses mesures effectuées sur l'homme que l'acide carbonique éliminé en moyenne dans les vingt-quatre

heures est d'environ 0 l. 250 par kilogramme et par heure. Ce chiffre tombe à 0,160 pendant les périodes de sommeil.

Chez le nouveau-né, cette élimination d'acide carbonique peut être deux, trois ou même quatre fois plus considérable ; il en est de même de l'absorption d'oxygène.

En examinant les nombres qui se trouvent dans mes tableaux, ce qui frappe plus particulièrement, c'est l'écart que l'on constate entre les divers sujets. On y trouve, en effet, des valeurs d'acide carbonique éliminé comprises entre 1 l. 064 et 0 l. 537 comme chiffres extrêmes. De même l'oxygène absorbé peut monter à 1 l. 248 et tomber à 0 l. 404. Ce sont ces variations dans le rapport de 3 à 1 qui me paraissent plus particulièrement intéressantes.

Je ferai remarquer en passant que le quotient respiratoire, c'est-à-dire le rapport des volumes d'acide carbonique aux volumes d'oxygène, est généralement élevé, contrairement aux résultats obtenus par Scherer.

A quoi sont dus les écarts relevés dans mes différentes expériences ?

Un premier facteur à considérer est l'état de repos ou de mouvement de l'enfant, facteur dont, évidemment, on ne dispose pas, mais que j'ai noté dans chaque expérience. Le mouvement augmente les échanges respiratoires, ainsi que cela est bien connu, et dans mon tableau, lorsque les expériences sont pour le reste comparables, on voit en effet les chiffres correspondant au sommeil du sujet être inférieurs à ceux de l'état de veille, et d'agitation ou de cris.

Mais en dehors de cette influence, on trouve des écarts dus à une autre cause, car, pendant le sommeil continu, on trouve chez certains enfants $CO^2 = 0,753$, $O = 0,801$, par exemple, alors que d'autres enfants, même avec agitation et pleurs, ne donnent que $CO^2 = 0,549$, $O = 0,459$, c'est-à-dire environ la moitié.

Pour établir une bonne base de comparaison, on peut faire appel à une notion de physiologie générale introduite pour la première fois dans la science par Bergmann et bien étudiée depuis par divers auteurs, en particulier par Ch. Richet.

« Les combustions de l'organisme se règlent, toutes choses égales

d'ailleurs, non sur le poids des sujets, mais sur leur surface. »

Quand on compare des sujets de même espèce, aussi semblables que des enfants, P représentant leur poids, on peut se contenter pour évaluer leur surface d'appliquer la formule dite de Meeh, $S = \sqrt[3]{P^2}$.

Les combustions de divers sujets de même espèce, et les phénomènes qui les accompagnent, en particulier l'intensité des échanges respiratoires, doivent donc être proportionnelles à $\sqrt[3]{P^2}$, et, en rapportant cette consommation à l'unité de poids, on obtient $\frac{\sqrt[3]{P^2}}{P} = \frac{1}{\sqrt[3]{P}}$, que je désignerai par α.

Si donc tous les sujets se trouvaient dans les mêmes conditions d'utilisation d'oxygène, ils devraient, par kilogramme, faire une consommation proportionnelle à α. En désignant l'oxygène absorbé par kilogramme-heure par Q, $\frac{Q}{\alpha}$ serait constant, quelle que soit la taille du sujet. En suivant les variations de $\frac{Q}{\alpha}$, on a réellement l'indication d'une utilisation surabondante ou défectueuse de l'oxygène : c'est pourquoi ce rapport peut être désigné par le nom d'*indice d'oxygénation*. Cet indice d'oxygénation est en somme le rapport de ce qu'un sujet prend réellement d'oxygène à ce qu'il devrait prendre normalement pour sa taille.

En appliquant cette formule à l'adulte pendant le cycle de vingt-quatre heures, P étant exprimé en kilos et Q en litres, on obtient un indice voisin de l'unité; 0,99 à 1,03, pour l'homme variant de 60 à 70 kilogrammes.

Voyons maintenant ce que l'on trouve chez le nourrisson.

J'ai calculé les indices correspondant à mes diverses déterminations chez le nouveau-né.

Dans les premiers jours après la naissance, l'indice d'oxygénation est un peu inférieur à la normale, mais il se relève ensuite et ne la dépasse guère; chez un seul sujet particulièrement beau il s'est élevé à 1,5 et même 1,8. Mes mesures ne comprennent pas les premières heures, il y a là une lacune à combler.

Mais si, chez les enfants que l'on peut qualifier de normaux, c'est-à-dire qui augmentent régulièrement de poids, l'indice d'oxygénation prend

une valeur un peu supérieure à l'unité, chez les débiles élevés à la couveuse il est franchement au-dessous, il est au voisinage de 0,5 et ne se relève pas ; c'est là un point qui me paraît important.

On aurait pu se demander si certains enfants ne s'oxygènent pas plus que d'autres parce que, étant plus robustes, ils s'agitent et dépensent davantage.

Mais cette explication ne peut pas nous contenter ; on a vu en effet plus haut que les robustes l'emportent sur les débiles, même alors que les premiers dorment au repos complet et que les seconds s'agitent. En dehors de l'influence de l'agitation, il faut chercher une autre cause à la variation de l'indice d'oxygénation.

Au cours de diverses recherches, j'ai montré que non seulement, comme on le savait, certains animaux peuvent vivre un certain temps à l'abri de l'air, y produisant du travail avec élimination d'acide carbonique, mais que cette production de travail ne se fait pas aux dépens de provisions d'oxygène tirées antérieurement de l'atmosphère.

Le muscle peut travailler sans intervention de l'oxygène de l'air. Celui-ci ne semble intervenir que pour éviter l'encombrement de l'organisme par des déchets et des produits toxiques. Autrement dit, l'oxygène est un épurateur.

Il se peut qu'il y ait lieu de rapprocher ce rôle épurateur de l'oxygène des bonnes conditions de développement des enfants robustes, tandis qu'il est insuffisant chez les débiles.

La production de la chaleur par les êtres vivants et la théorie de l'isodynamie alimentaire.

Bulletin de l'Académie de Médecine, 2 Novembre 1909.

Deux théories sont en présence pour expliquer la façon dont les organismes vivants utilisent l'énergie mise en liberté par la combustion des aliments. On oppose généralement la théorie isodynamique dite de Rubner et d'Atwater à la théorie isoglycosique de Chauveau.

Je montre qu'il n'y a pas de divergence importante entre Rubner et

Chauveau et que les conclusions tirées du travail d'Atwater sur l'alcool dépassent la portée réelle des expériences de ce savant.

Étude des échanges respiratoires chez un obèse soumis à la cure de réduction alimentaire et au traitement thyroïdien.
(En collaboration avec M. Marcel Labbé).
Comptes rendus de la Société de Biologie, 17 *Juillet* 1909.

Sur les échanges gazeux de la grenouille — Action de la lumière.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 7 *Mars* 1908.

Contrairement à ce qui a été avancé par la plupart des auteurs, les échanges gazeux de la grenouille ne se modifient pas lorsque l'animal passe de l'obscurité à la lumière blanche ou colorée, ou tout au moins il n'y a pas d'action directe. Si l'on a observé en général un accroissement de l'acide carbonique exhalé et de l'oxygène absorbé, cela tient à ce que la grenouille est plus active à la lumière que dans l'obscurité. — Or, tout travail musculaire augmente les échanges. — Ceci résulte de nombreuses mesures que j'ai faites en supprimant la cause d'erreur résultant des mouvements de la grenouille, soit par le curare, soit en lui détruisant le cerveau antérieur quelques jours avant l'expérience et laissant la plaie opératoire se cicatriser.

Influence de la température sur les échanges gazeux de la grenouille.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 14 *Mars* 1908.

Sur l'élimination de l'Acide carbonique par la grenouille dans un gaz inerte.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 21 *Mars* 1908.

Sur les échanges gazeux de la grenouille passant alternativement par l'air et par l'hydrogéne.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 28 *Mars* 1908.

Dans les deux notes qui précèdent, je montre que l'élimination de l'acide carbonique dans un gaz inerte est généralement un peu plus abondante que dans l'air atmosphérique, et que, lorsque la grenouille ayant séjourné dans le gaz inerte revient à l'air, elle ne fait pas de provision d'oxygène. Tout ce qu'elle prend est consommé comme en temps normal.

Il en résulte ce fait, en apparence paradoxal, qu'en faisant séjourner des grenouilles alternativement dans l'air et dans un gaz inerte elles finissent par mourir toujours au bout du même temps de séjour total dans le gaz inerte, quels que soient les passages dans l'air.

La contraction musculaire dans les gaz inertes. — La fatigue du muscle et sa réparation.

Comptes rendus de la Société de Biologie, 4 *Avril* 1908.

Longue étude graphique de la contraction musculaire dans l'air et les gaz inertes à diverses températures.

Sur le rôle de l'Oxygène.

Comptes rendus de la Société de Biologie, 11 *Avril* 1908.

J'arrive finalement à cette conclusion qui, par exclusion, me paraît seule permettre l'interprétation de mes expériences, que l'oxygène n'est pas directement consommé dans le travail physiologique et lors de la contraction musculaire, mais que les transformations intraorganiques se passent en deux temps. Un premier temps sans intervention de l'oxygène de l'air, donnant lieu à des produits toxiques, qui sont détruits dans un second temps avec le concours de cet oxygène.

Recherches sur les phénomènes thermiques qui accompagnent les échanges respiratoires de la grenouille dans l'air et les gaz inertes.

Comptes rendus de la Société de Biologie, 21 *Novembre* 1908.

Sur la température de la grenouille dans divers gaz.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 28 Novembre 1908.

Les recherches rapportées dans ces deux notes complètent les précédentes. Au lieu de mesurer les échanges gazeux de la grenouille, je détermine ses variations de calorification, par une méthode qui n'avait encore jamais été employée avant moi.

De l'utilisation des aliments pour la production de l'énergie chez les hétérothermes.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 23 Avril 1910.

Influence de l'albumine et du glucose sur les échanges gazeux de la grenouille.
Comptes rendus de la Société de Biologie, 30 Avril 1910.

Recherches concernant l'influence de l'alimentation sur les échanges gazeux de la grenouille.
Journal de Physiologie et de Pathologie générale. Tome XII, 1910, p. 457-471.

Il est difficile, sinon impossible de se rendre compte sur les homéothermes de la façon dont se fait l'utilisation des aliments pour les besoins de la vie, le travail physiologique de l'organisme et la production de l'énergie. Est-ce suivant la règle de l'isodynamie ou suivant une autre règle? La cause de cette difficulté réside dans la régulation de la température chez les homéothermes, qui restreint ou accélère les combustions dans les tissus, en particulier dans les muscles, pour compenser tous les déficits ou excédents de combustions alimentaires. Rubner avait essayé d'éluder la difficulté en opérant sur des chiens séjournant dans une enceinte à haute température de façon à supprimer toute régulation, mais les animaux se trouvaient ainsi dans de mauvaises conditions. Malgré cela,

Rubner obtint des résultats très importants et montra que tout aliment albuminoïde donne lieu, par rapport au régime normal, à un excédent de chaleur par suite de la nécessité d'une élaboration précédant son utilisation par l'organisme.

Moi-même j'ai abordé le problème en opérant sur les hétérothermes qui normalement n'ont aucune régulation de température. Pareille étude n'avait encore jamais été tentée et j'ai pu montrer que, chez ces animaux, on retrouvait, à la température habituelle du laboratoire, le phénomène auquel on devait s'attendre d'après les idées de Chauveau et de Rubner.

TITRE X

Enregistrement simultané des électrocardiogrammes et des bruits du cœur.

Bulletin de l'Académie de Médecine, 19 *juillet* 1910.
(En collaboration avec M. L. Bull.)

En présence des nombreux travaux exécutés à l'étranger au moyen du galvanomètre à corde d'Einthoven, j'ai fait installer cet instrument à l'Institut Marey en apportant au dispositif général une série de modifications permettant à un seul opérateur de prendre un tracé, alors qu'il faut généralement plusieurs aides.

Un deuxième appareil, le phonoscope d'Otto Weiss, permet d'enregistrer les bruits du cœur.

Dans l'installation de l'Institut Marey, grâce à un artifice particulier, les deux appareils peuvent inscrire leurs tracés sur un même pellicule sensible. On obtient ainsi des clichés magnifiques permettant d'étudier les variations de forme de l'électrocardiogramme et les tracés des bruits du cœur à l'état normal et pathologique. Ces deux tracés, étant pris simultanément, sont repérés l'un par rapport à l'autre d'une façon irréprochable.

Depuis deux ans de nombreux malades sont venus à l'Institut Marey soit des hôpitaux, soit de la ville, envoyés par des médecins pour faire prendre leur tracé.

Les collections de l'Institut s'enrichissent de plus en plus, et la comparaison avec les observations médicales permettra sous peu d'établir les lois de l'interprétation à donner aux divers tracés.

En utilisant les tracés des bruits du cœur, on peut, à l'aide d'un appareil construit à l'Institut Marey, reproduire le bruit primitif. Cette méthode a principalement un intérêt pédagogique, car il est possible de faire une collection des divers bruits pathologiques du cœur pour les faire entendre aux élèves.